A. DUPONT

A. CASTELL

technologie

PROFESSIONNELLE GÉNÉRALE

professions de la mécanique

Classes de 1re et de Technique Industrielle des Lycées Techniques. Classes de préparation au baccalauréat technique.

3e partie

TRAVAUX RÉALISÉS SUR LES MACHINES-OUTILS

DESFORGES
PARIS

OUVRAGES DES MÊMES AUTEURS

DUPONT A. et CASTELL A. — Technologie professionnelle générale :

Anciennes classes de 4e des Lycées techniques et classes de 1re année des Collèges d'enseignement technique, 1964.

Anciennes classes de 3e des Lycées techniques et classes de 2e année des Collèges d'enseignement technique, 1963.

Classes de 2e des Lycées techniques, de 3e année des Collèges d'enseignement technique, de préparation de l'examen probatoire du baccalauréat, 1963.

Classes de 1re des Lycées techniques, 1re partie : Métrologie des surfaces, 1964, et 2e partie : Etude fonctionnelle des machines-outils, 1961.

CASTELL A. — Organisation industrielle :

Classes de 1re et de Technique industrielle des Lycées techniques - Initiation, 1963.

Classes de Techniciens et de Techniciens supérieurs - Plan d'organisation adapté aux moyennes et petites entreprises, 1958.

TECHNOLOGIE
PROFESSIONNELLE GÉNÉRALE

PROFESSIONS DE LA MÉCANIQUE

CLASSES DE 1re ET DE TECHNIQUE INDUSTRIELLE
DES LYCÉES TECHNIQUES
CLASSES DE PRÉPARATION AU BACCALAURÉAT TECHNIQUE

3e partie

TRAVAUX RÉALISÉS SUR LES MACHINES-OUTILS

A. DUPONT
PROFESSEUR TECHNIQUE CHEF DES TRAVAUX
AU LYCÉE TECHNIQUE D'ÉTAT D'AULNAY-SOUS-BOIS

A. CASTELL
INGÉNIEUR A. ET M.
DIRECTEUR DU LYCÉE D'ÉTAT DE CORBEIL-ESSONNES

DESFORGES
ÉDITEUR
29, quai des Grands-Augustins — Paris 6e
1964

Tous droits de traduction, de production et d'adaptation réservés pour tous pays.
© by DESFORGES Paris 1964

TABLE DES MATIÈRES

ÉTUDES COMPARÉES DES TRAVAUX RÉALISÉS SUR LES MACHINES-OUTILS

PRINCIPES FONDAMENTAUX

Pages

But à atteindre 15

Choix de l'outil.

Outils d'enveloppe 16
Outils de forme 18
Outils travaillant par génération particulière 20

Choix de la machine.

Machines banales de mécanique générale, machines de production, machines à destination spéciale 21

Choix des conditions de travail 22

Respect de la précision imposée.

Echauffement de la pièce, détérioration de l'outil, déformations dues à l'effort de coupe... 23

Ordre des phases de fabrication 26

Organisation de la production 27

Les travaux de surfaçage plan

LE RABOTAGE

Principe de rabotage 28

Machines à raboter.

Etau-limeur, raboteuse 29
Avantages de la raboteuse sur l'étau-limeur, comparaison de la précision de la raboteuse et de celle de l'étau-limeur 32
Mortaiseuse 34

Observations sur les travaux de rabotage.

Réglage de la tête porte-outil : pour le rabotage vertical, pour le rabotage oblique 35
Réglage de l'outil par cale et broche, par gabarit et broche 36
Disposition de la pièce par rapport au mouvement de coupe 36

Etat d'une surface rabotée 37

LE FRAISAGE

Pages

Principe du fraisage 38

Fraisage de profil.

Fraises de profil, fraisage à la fraise à taille droite, fraisage à la fraise à taille hélicoïdale... 39
Modes d'action d'une fraise : fraisage en opposition, fraisage en concordance, système de freinage de la table 41
Etat d'une surface fraisée de profil 43

Fraisage de face.

Fraises de face, actions réciproques de la pièce et de l'outil 44
Etat d'une surface fraisée de face 46

Conditions de coupe des fraises.

Vitesse de coupe, section du copeau, avance par tour et par dent 48
Calcul de l'effort de coupe, de la puissance de coupe 50

Les machines à fraiser.

Machines de production : fraiseuse verticale, fraiseuse horizontale, fraiseuse-raboteuse 51
Machines d'outillage 52

Travaux de fraisage.

Réglage de la position de la broche 53
Choix de la fraise, train de fraises 53
Trajectoire élastique relative de l'outil 55

Méthodes de fraisage.

Méthode de la pièce unique 55
Méthode du fraisage alternatif 56
Méthode des pièces en parallèle 56
Méthode de la base pivotante 57
Méthode du fraisage circulaire 57

Fraisage par reproduction.

Reproducteur mécanique 58
Reproducteur hydraulique 59
Fraisage automatique à cycle dit cubique 59

LE BROCHAGE

Principe du brochage 60

Étude d'une broche.

Mode d'action d'une broche pour brochage extérieur, action et réaction de la pièce et de l'outil 60
Broche pour brochage intérieur 62
Caractéristiques d'une broche 63
Vitesse de coupe d'une broche 65

Les machines à brocher.

Machine horizontale, machine verticale 65

Travaux de brochage.

Brochage extérieur, brochage d'une surface plane, combinaison de broches, brochage de surfaces quelconques 66
Brochage intérieur, brochage de trous prismatiques, brochage de trous pyramidaux 68

OBTENTION DU PLAN PAR TOURNAGE

Pages

Génération du plan par tournage 70

Réalisation pratique.

Sur tour horizontal, sur tour vertical 70

Les travaux de perçage

Outils de perçage.

Foret hélicoïdal, porte-lame et mèche à pilote, forets spéciaux pour perçages profonds 73

Conditions de coupe des forets.

Vitesse de coupe, section du copeau, efforts de coupe, évacuation des copeaux, arrosage .. 76

Les machines à percer.

Perceuse sensitive 77
Perceuse à colonne 78
Perceuse radiale 79
Perceuse à broches multiples : perceuse à broches en ligne, perceuse à broches à entraxe variable 80
Machine à pointer 81

Travaux de perçage.

Perçage à l'outil libre, causes de mauvais perçages, précautions en vue d'un perçage correct 82
Perçage à l'outil guidé 84
Perçage de trous prismatiques : construction du foret, utilisation du foret 85

Les travaux d'alésage

Généralités 86

Les outils d'alésage.

Outils de forme : alésoirs à dimension fixe, alésoirs d'ébauche, alésoir de demi-finition, alésoir de finition, foret aléseur 86
Alésoirs expansibles 89
Conditions de coupe des alésoirs : réserve d'alésage, avance par tour, vitesse de coupe .. 89
Broches pour alésage 90
Outils d'enveloppe : outils de tour, barre d'alésage, efforts sur l'outil 91
Liaison de la barre avec la broche de la machine : attelage rigide, attelage flottant 95

Défauts types d'alésage.

La barre est en porte-à-faux 96
La barre est supportée par deux lunettes 97

Les machines à aléser.

Aléseuse à montant fixe 99

Travaux d'alésage.

Alésage à la perceuse : alésage à l'alésoir, alésage à la barre sur perceuse radiale 100
Alésage au tour : alésage à l'alésoir, alésage à la barre 102
Alésage à la fraiseuse : alésages verticaux, alésages horizontaux 104
Alésage à l'aléseuse : ordre des opérations 105
Alésage conique 108
Alésage à la machine à pointer, accessoires pour machine à pointer 109

Les travaux de tournage

Pages

Généralités. 116

Les outils de tournage.

Outils d'enveloppe : outil à charioter, efforts sur l'outil et sur la pièce, outil couteau..... 116
Outils de forme..... 119
Mesure et valeur des efforts de coupe..... 120

Défauts des pièces tournées..... 122

Montage des pièces.

Montage entre pointes : principe, importance de la position des centres, importance de la concentricité de la pointe, utilisation des pointes tournantes..... 123
Montage en mandrin à serrage concentrique..... 125
Montage en plateau à mors indépendants, montage en plateau à trous, conditions d'équilibre du plateau..... 127

Différents tours et travaux de tournage.

Tour parallèle à charioter, tour parallèle à charioter et à fileter..... 130
Tour révolver ordinaire, outils pour tour révolver..... 130
Tour semi-automatique, travail sur tour semi-automatique..... 134
Tour automatique, travail sur tour automatique..... 134
Tour à reproduire : reproducteur mécanique, reproducteur hydraulique..... 137
Travaux au reproducteur hydraulique..... 142
Reproducteur mécanique tournant..... 144
Tour vertical..... 145

Les travaux de rainurage

Rainurage par fraisage.

Rainures extérieures : rainures à section rectangulaire, rainures en té, cannelures des arbres, rainures hélicoïdales..... 146
Rainures intérieures..... 148

Rainurage par rabotage.

Rainures extérieures : rainures à section rectangulaire, rainures en té..... 148
Rainures intérieures..... 149

Rainurage par brochage.

Rainures extérieures..... 150
Rainures intérieures..... 150

Les travaux de rectification

L'OUTIL MEULE

Caractéristiques d'une meule.

Nature de l'abrasif, grosseur des grains, grade, structure, agglomérant..... 152

Conditions d'utilisation des meules.

Vitesse circonférentielle, grandeur de l'avance, profondeur de passe, arrosage..... 155

RECTIFICATION PLANE

Principe. Pages

Par outil de forme, par outil d'enveloppe 158

Rectification par meule travaillant tangentiellement.

La surface est étroite, la surface est large 159
La surface est circulaire 160

Rectification par meule travaillant de face 161

Meulage des pièces brutes 161

Machines de rectification plane.

Machines simples 162
Machines à têtes multiples 163

Travaux de rectification plane 163

RECTIFICATION CYLINDRIQUE

Rectification avec porte-pièce tournant.

Rectification extérieure du cylindre et du cône : principe, rectification des pièces longues, rectification des surfaces courtes, rectification d'épaulements 165
Rectification intérieure du cylindre et du cône : rectification des pièces montées en l'air, rectification des pièces de grande excentration, rectification d'épaulements 167

Machines à rectifier cylindrique 168

Rectification sans centres.

Rectification en plongée : principe, équilibre et entraînement de la pièce, exemples de travaux en plongée 169
Rectification intérieure sans centres 172
Rectification à l'enfilade : principe, travaux de rectification à l'enfilade 172

Les travaux de rodage et de superfinition

Généralités.

Rodage.

Principe, rodage mécanique plan 174
Rodage extérieur cylindrique, rodage intérieur cylindrique 175

Superfinition.

Opérations de superfinition 176
Comparaison de surfaces rectifiées et de surfaces superfinies 177
Rectification fine 177

Les travaux d'affûtage

AFFUTAGE DES OUTILS DE TOURNAGE ET DE RABOTAGE

Généralités 178

Éléments fonctionnels d'un outil de coupe.

Eléments de mise en place 178
Eléments de forme de la partie active 179
Eléments de fabrication. — Affûtage de la face d'attaque 180
Eléments de fabrication — affûtage de la face en dépouille 182

Positionnement de l'outil pour son affûtage. Pages
Affûtage de la face d'attaque ... 183
Affûtage de la face en dépouille ... 183
Machines à affûter les outils de tournage et de rabotage ... 186
Particularités pour l'affûtage des outils en carbures métalliques ... 186

AFFUTAGE DES FRAISES

Fraises à denture fraisée.
Affûtage périphérique ... 189
Affûtage en bout, retaillage en bout ... 192

AFFUTAGE DES FORETS, DES ALÉSOIRS ET DES TARAUDS

Affûtage des forets ... 193
Affûtage des alésoirs ... 195
Affûtage des tarauds ... 195

Les travaux de filetage

FILETAGE A L'OUTIL DE COUPE

Filetage à l'outil à taillant unique.
Etablissement de l'outil ... 196
Filetage au tour parallèle, filetage sur machine spéciale ... 197
Filetage à la fraise.
Filetage à la fraise unique, filetage à la fraise multiple ... 199
Machines à fileter à la fraise ... 201
Filetage à la filière.
Filière à peignes tangentiels, filière à peignes radiaux ... 201
Machines à filières à peignes ... 202

FILETAGE PAR MEULAGE

Filetage à la meule à profil unique ... 203
Filetage à la meule à profils multiples.
Filetages courts, filetages longs ... 204

FILETAGE PAR DÉFORMATION DU MÉTAL

Généralités ... 205
Filetage en plongée.
Action des molettes ... 206
Machines pour filetage en plongée ... 206
Filetage à l'enfilade ... 208
Filetage par peignes ... 208

LE TARAUDAGE

Pages

Généralités 209

Taraudage sur perceuse.

Sur perceuse sensitive, sur perceuse spéciale 209

Machines spéciales à tarauder 213

Les travaux de taillage

Caractéristiques d'une roue à denture droite 214

TAILLAGE A L'OUTIL DE FORME

Les outils.

Fraise au module, fraise bouchon 215

Les machines 216

TAILLAGE PAR GÉNÉRATION

Profils conjugués en développante de cercle 218

Principe de la taille par génération 218

Taillage à l'outil crémaillère.

L'outil, le cycle de travail 219
Les machines 221
Taillage hélicoïdal, possibilités du taillage à l'outil crémaillère 221

Taillage à l'outil pignon.

L'outil, le cycle de travail 222
Les machines 223
Possibilités du taillage à l'outil pignon 224

Taillage à la vis fraise.

Cinématique du système roue et vis sans fin, principe du taillage à la vis fraise, positionnement de la fraise, liaison outil-pièce 224
Les machines 226

Taillage des roues tangentes.

Taillage à la fraise mère, taillage pas vis fraise conique, taillage à l'outil mouche 228

Taillage des vis sans fin.

Taillage à la fraise de forme, taillage à l'outil pignon 229

Taillage des pignons coniques

Caractéristiques d'une roue conique 231

TAILLAGE DES PIGNONS CONIQUES A DENTURE DROITE

Taillage par reproduction. Pages

Principe 232
Les machines 233

Taillage par génération.

Principe 233
Les machines : machines Gleason, machine Reinecker 235

Procédé Révacycle 237

TAILLAGE DES PIGNONS CONIQUES A DENTURE COURBE

Taille en spirale.

Taillage par fraise frontale 237

Taille hypoïde 241

Rectification des roues dentées

Rectification par meule de forme.

Meule à profil de l'entre dents, meule à un seul profil de l'entre dents, meules à un seul profil couplées, comparaison des procédés 242

Rectification par génération.

Principe, réalisation de principe de la machine 243

Rectification des vis sans fin 245

ARASAGE DES DENTURES

Principe de l'arasage 246

Principe de réalisation de la machine 246

RODAGE DES DENTURES

Principe du rodage des dentures 248

Les travaux d'assemblage

Généralités 249

Plan de montage.

Montage des sous-ensembles 249
Montage de l'ensemble 252

Montage à l'unité 254

Montage en série et manipulation des pièces.

Montage en petite série 254
Montage en grande série, poste de travail fixe, poste de travail mobile 255

Travaux de démontage 256

L'usinabilité

Pages

Définition 257

Facteurs d'usinabilité.

Propriétés mécaniques du métal usiné, vitesse de coupe et avance, copeau adhérent, travail sous lubrification 257

Temps de coupe

Calcul du temps de coupe.

Temps de coupe pour le mouvement circulaire 261
Temps de coupe pour le mouvement rectiligne 263

Temps d'usinage.

Travail à l'unité, travail en série 264

Les abaques et leur utilisation

Abaques pour déterminer la vitesse de coupe.

Pour le mouvement circulaire 265
Pour le mouvement rectiligne 266

Abaques pour déterminer les vitesses de coupe corrigées V_o et V_e 267

Abaques pour déterminer le temps de coupe 269

Principes généraux d'établissement des montages d'usinage

Généralités.

Atteinte de la précision, élimination des temps morts 270

Conditions que doit remplir un montage d'usinage.

Nombre de pièces à usiner, construction, précision, montage et démontage des pièces, sécurité, normalisation des éléments 270

Types de montages d'usinage.

Montage de perçage et de lamage, montage de perçage et d'alésage, montage de perçage et de lamage à division, montage de fraisage, montage de rabotage, montage de tournage, montage à serrage pneumatique 272

Établissement d'une gamme d'usinage

Généralités 284

Bases de l'établissement d'une gamme d'usinage.

Analyse du problème 284

Exemple de gamme d'usinage pour une série de cinq supports.

Etude du dessin, discussion de la gamme 285

Exemple de gamme d'usinage pour une série de vingt mille supports 296

AVANT-PROPOS

Nous avons considéré la matière des ouvrages précédents (classes de 4e, 3e et 2e des Lycées Techniques) comme un outil indispensable à la continuation de l'étude de la technologie et ceci explique que nous ayons découpé le texte en leçons suivies de résumés.

Avec le programme de la classe de 1re, il ne s'agit plus de leçons proprement dites, mais d'application raisonnée. Nous nous sommes donc efforcés de développer chez l'élève l'esprit d'analyse et de méthode sans perdre de vue que tout doit être mis en œuvre pour permettre le choix de la solution adaptée au problème posé. C'est ainsi que se concrétise l'utilisation des connaissances précédemment acquises.

Il résulte de l'orientation ainsi donnée à ce nouvel ouvrage que le maître est seul juge pour s'étendre comme il le désire sur chaque point particulier et que la division en leçons ne saurait convenir. Nous avons donc abandonné à la fois le découpage du texte et la rédaction des résumés.

La matière contenue dans ce 3e fascicule est absolument conforme au programme des classes de technique industrielle et du baccalauréat technique.

L'ensemble des trois fascicules réservés à la classe de 1re des Lycées Techniques se situe dans les programmes de 1re industrielle, de 1re technique industrielle, de technique industrielle et de technique et mathématiques.

LES AUTEURS.

ÉTUDES COMPARÉES DES TRAVAUX RÉALISÉS SUR LES MACHINES-OUTILS

PRINCIPES FONDAMENTAUX

L'étude préalable de tout procédé de fabrication est, en raison de la diversité des moyens mis en jeu pour l'organisation de la production, d'une absolue nécessité. Cette étude est confiée au technicien préparateur du travail, agent technique ou exécutant lui-même, suivant l'importance de l'entreprise ou le caractère de la production.

En fabrication mécanique, il faut toujours en effet, une fois le produit défini dans sa nature et dans son état, respecter des formes et des dimensions avec un minimum de correction géométrique et de précision. Mais il faut aussi, pour que la production soit rentable, mettre en jeu des procédés aussi économiques que possible tant du point de vue prix du matériel de production utilisé que de la rapidité d'exécution qu'il permet.

Il importe donc que le technicien soit averti :

— des possibilités que lui offrent les outillages et les machines dont il dispose;

— des servitudes qui s'attachent à ces outillages et à ces machines;

— des dispositions à prendre pour rendre plus fécondes les possibilités et moins gênantes les servitudes;

— de la supériorité de tel procédé de fabrication sur tel autre, lorsqu'il aura à se poser objectivement le problème du choix.

Avant d'entreprendre l'étude des travaux réalisables en particulier sur chaque machine-outil, nous rappellerons les principes dont tout technicien doit se pénétrer.

I. — BUT A ATTEINDRE

Avant de procéder à l'étude de fabrication, il faut :

— placer la pièce à façonner dans l'ensemble auquel elle appartient pour se pénétrer de l'importance relative des surfaces, de leur interdépendance, de la correction géométrique qu'elles requièrent, de la précision de leurs dimensions;

— confronter les exigences du dessinateur, traduites par les signes de façonnage, d'état de surface ou par les tolérances de fabrication portés sur le dessin de définition de chaque pièce, avec les résultats de la précédente analyse;

— proposer des modifications susceptibles d'apporter des simplifications;

— définir la cadence de production imposée par la nécessité de la vente du produit, ainsi que l'importance de la production globale.

Compte tenu de ces divers éléments, et alors seulement, on peut trouver une solution au problème posé.

II. — CHOIX DE L'OUTIL

Les outils sont de deux types : outils d'enveloppe ou outils de forme.

A. OUTILS D'ENVELOPPE.

La forme de la partie active de l'outil est théoriquement indépendante de la forme à obtenir puisque la surface engendrée par l'outil est l'enveloppe des positions qu'il a prises au cours du façonnage. Cependant, pratiquement en raison de la discontinuité des mouvements de l'outil et de la pièce, la correction géométrique de la surface dépend de la loi du déplacement de l'outil et de la forme de son profil.

Outil type à charioter (fig. 1).

Il donnera un sillon d'autant plus marqué que sa pointe sera plus aiguë et que l'avance par coup ou par tour sera grande. Mais plus la forme du profil se rapprochera de celle de la surface à obtenir et plus les conditions de travail seront mauvaises. Il faut tenir compte en effet de l'effort

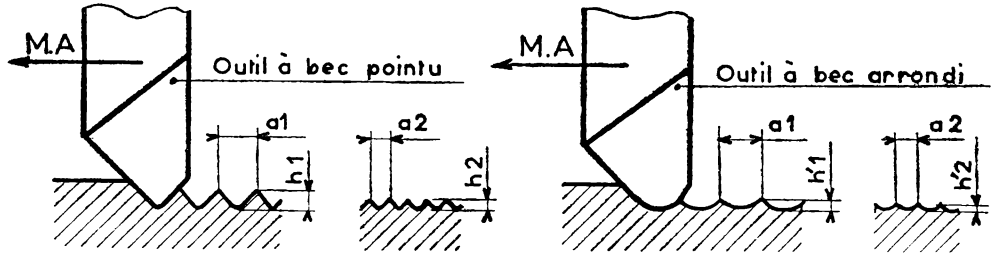


Fig 1 - Outils d'enveloppe et surfaces obtenues $h_1 > h'_1$, $h_2 > h'_2$.

de coupe qui augmente considérablement avec la longueur d'arête active (fig. 2) et aussi de la valeur minimale de l'épaisseur du copeau qui dépend de la finesse de l'arête (voir leçon n° 13, classe de 3e). La trajectoire de l'outil serait alors matérialisée sur la pièce par une suite d'ondulations et d'arrachements (fig. 2).

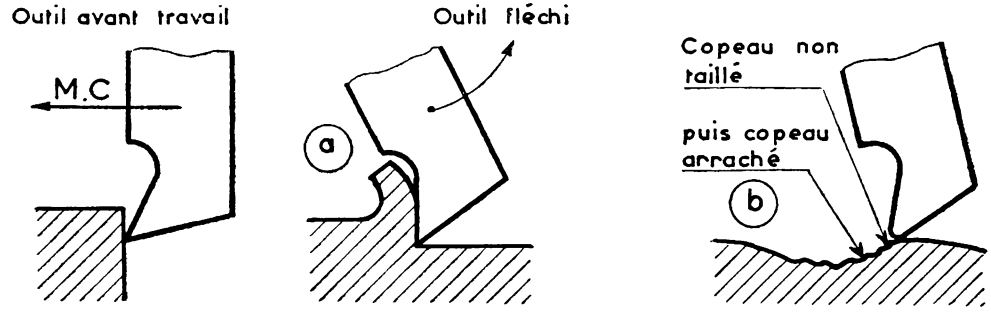


Fig 2-(a) Grande longueur d'arête coupante en action : l'outil fléchit.
(b) Si la profondeur de passe est faible, l'outil ne coupe pas.

L'engagement d'un outil d'enveloppe du type à charioter provoque, dans le cas du rabotage, un choc et, par suite, une déformation élastique importante. La surface obtenue se présente comme l'indique la figure 3 pour un outil à trajectoire élastique engageante.

En conclusion, l'outil d'enveloppe de tournage et de rabotage, facile à construire et à affûter, donc utilisable à la vitesse de coupe économique, sera employé avec intérêt pour les travaux d'ébauche ou de demi-finition.

Il ne permettra une bonne correction géométrique et une bonne précision de cote (qualités 9 à 7) qu'en travaillant à faible section de copeau.

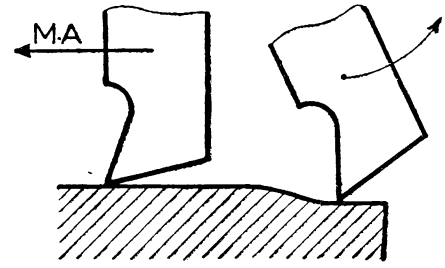


Fig 3 - Incorrection due au fléchissement de l'outil.

Outil type fraise de face (fig. 4).

Chaque dent de la fraise laisse sa trace sur la surface d'autant plus marquée que son arête coupante dépasse celle de la dent la plus basse (imperfection d'affûtage par exemple). L'incorrection géométrique est donc périodique et pourrait se comparer à celle que laisse un outil à charioter si la partie arrière de la fraise ne venait frotter sur la surface taillée par la partie avant. Le croisement des traits qui en résulte oblige à augmenter la course d'une longueur égale au diamètre de la fraise pour que la surface présente un aspect régulier.

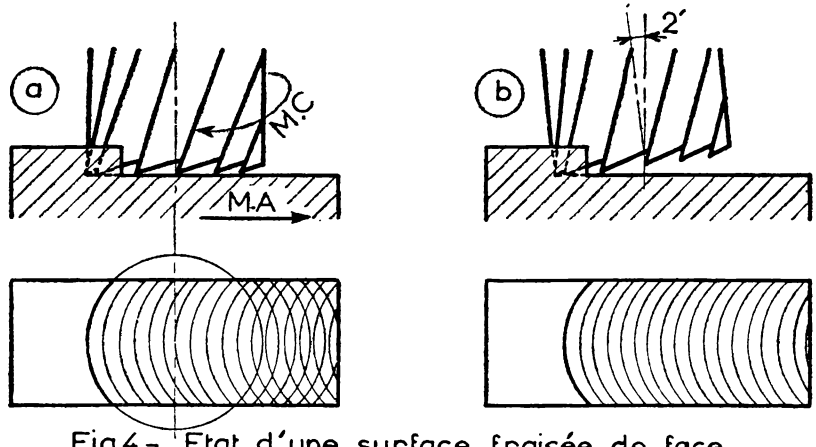


Fig 4 - Etat d'une surface fraisée de face
(a) Fraise normale à la surface : trait croisé.
(b) Fraise inclinée sur la surface : trait non croisé.

En inclinant la broche de 2' environ par rapport à la verticale, la fraise ne frotte plus par sa partie arrière, le trait n'est plus croisé (fig. 4) et la course est réduite au minimum. La très légère concavité de la surface obtenue est sans importance.

La fraise de face ne provoque pas d'incorrection géométrique de la surface dans sa période d'engagement, elle permet une bonne précision de cote (qualité 8 à 7), même en une seule passe.

Outil type meule (fig. 5).

Le déplacement axial de la meule, **ou avance,** par rapport à la pièce, à chaque tour de pièce si elle est de révolution, à chaque course de la pièce dans le cas contraire, influe sur la correction géométrique de la surface.

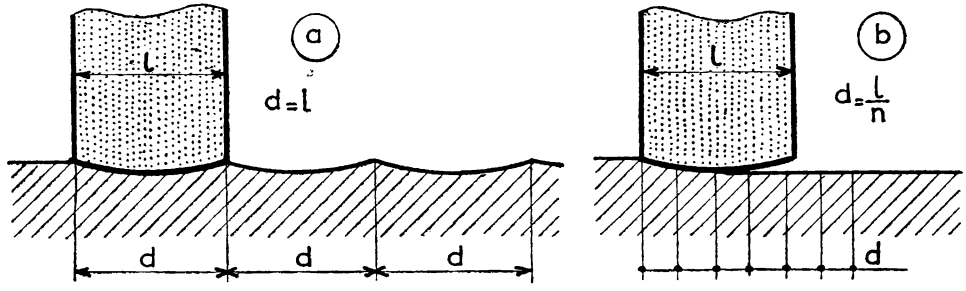


Fig 5 - Travail à l'outil meule

(a) Déplacement axial de la meule égal à la largeur.
(b) Déplacement axial de la meule très inférieur à la largeur.

En effet, lorsque ce déplacement de la meule est voisin de sa largeur, les imperfections du profil se retrouvent périodiquement sur la surface. Il ne faudra donc retenir ce procédé — qui donne d'ailleurs à la meule le minimum d'usure — que pour l'approche de la cote.

Au contraire, lorsque ce déplacement est de beaucoup inférieur à la largeur de la meule — jusqu'au 1/6 de cette largeur — la surface obtenue est beaucoup plus correcte. Il faudra donc réduire le déplacement axial en fonction de la correction de surface recherchée.

B. OUTILS DE FORME.

La forme du profil de l'outil s'identifie avec celle de la surface à obtenir. L'outil n'a donc qu'un mouvement de pénétration dans la matière : c'est son avance.

Outils non tournants.

Ils se présentent sous la forme d'une lame (fig. 6), dont la longueur d'arête en contact avec la pièce est souvent très grande. Il en résulte donc des efforts de coupe importants et, par suite, des déformations appréciables des supports de pièce et d'outil. De plus, chaque point de l'arête coupante ne répond qu'imparfaitement aux conditions de coupe (angles caractéristiques de coupe) et le copeau est parfois mal coupé et la surface obtenue broutée ou arrachée ou géométriquement incorrecte.

L'outil de forme de ce type ne se prête donc pas à un façonnage précis.

L'adoption du profil constant (fig. 7), outil courbe par exemple, facilite l'affûtage et prolonge la durée de l'outil, mais ne corrige pas la qualité de surface obtenue.

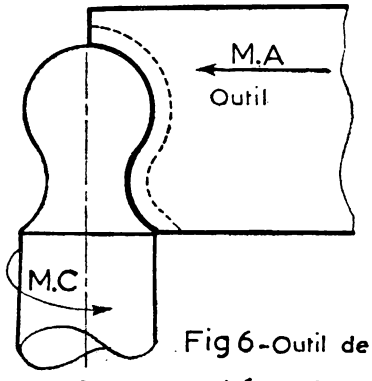


Fig 6-Outil de forme, profilé droit.

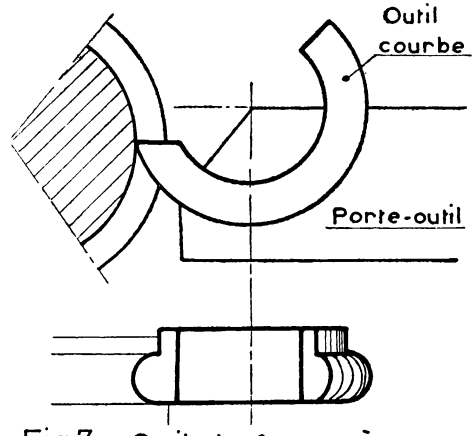


Fig 7- Outil de forme à profil constant.

Outil type fraise de profil.

Le profil de la fraise se reproduit d'autant plus fidèlement que l'avance par dent est plus faible, mais cette condition s'oppose au respect de la section minimum du copeau que l'outil peut couper. Il s'ensuit que la surface obtenue n'est jamais parfaitement finie et que l'on y retrouve toujours la trace de chaque dent comme l'indique la figure 8.

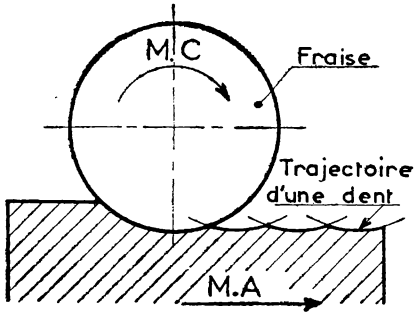


Fig 8- Etat d'une surface fraisée de profil

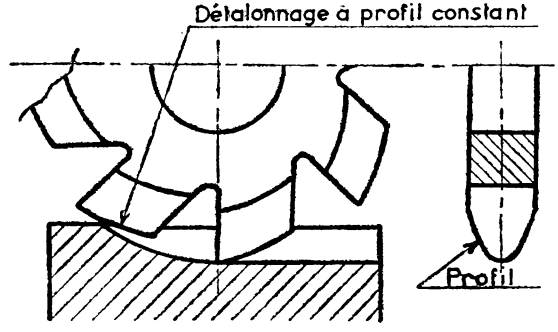


Fig 9- Fraise de forme à profil constant.

La fraise de forme, quand elle est à profil rectiligne ou à profil constant (fig. 9), grâce à la dépouille construite une fois pour toutes, est cependant un outil de production économique.

Outils tournants types foret ou alésoir.

Les forets et alésoirs reproduisent leur section par rotation et pénétration axiale. Il s'ensuit que la qualité de la surface obtenue dépendra pour une grande part de l'adaptation de l'arête coupante aux conditions de travail. L'influence de l'avance, liée à la finesse d'arête, sera prépondérante. Une arête grossière ne s'accommodera pas d'une avance faible, puisque le copeau minimum ne sera pas atteint. Par ailleurs, une grande avance laissera des sillons assez prononcés et aura tendance à faire fléchir l'outil.

Par suite, le foret ordinaire ne donnera que des trous imprécis (qualités 10 et au-delà le plus souvent), mais l'alésoir machine, mieux guidé, donnera des trous bien calibrés (qualités 7 et 8).

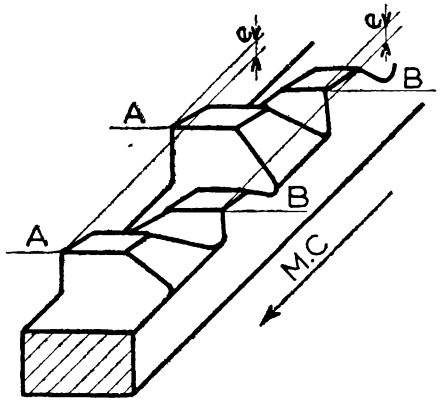


Fig 10- Broche à dents alternées (e_s épaisseur du copeau coupé par les dents A et B)

Outil type broche.

Chaque dent de la broche s'apparente à un outil de forme non tournant. Cependant l'exécution d'une broche est faite avec un soin tout particulier et chaque arête ne coupe qu'un faible copeau laissé par la précédente. De plus, bien que la machine utilisée soit extrêmement rigide, la section de copeau coupée par chaque dent peut, dans certains cas particuliers, être limitée grâce à l'alternance des contacts (fig. 10). Enfin, les dernières dents ne faisant que passer sur la surface déjà façonnée agissent comme outils de calibrage.

Les surfaces obtenues par brochage sont donc géométriquement correctes et généralement bien finies.

Outil type meule.

La meule travaillant en plongée laisse la trace fidèle de son profil. L'adaptation des caractéristiques de la meule au métal à façonner et à la correction géométrique de la surface souhaitée permettra toujours d'obtenir un façonnage de qualité. Mais l'usure de la meule provoquera une variation du profil. Il faudra donc la tailler fréquemment. L'utilisation d'un diamant pour cette opération ne sera commode et économique que si son mouvement permet d'engendrer la forme du profil par un agencement cinématique approprié.

C. OUTILS TRAVAILLANT PAR GÉNÉRATION PARTICULIÈRE.

Ces outils peuvent être d'enveloppe ou de forme et, étant donné que leur conception est fonction de chaque problème particulier, nous n'en donnerons que quelques exemples.

Outils type taraud.

La génération du taraudage est obtenue par le vissage du taraud dans l'avant-trou. La qualité du travail dépend donc de celle du taraud d'abord, ensuite de la façon dont le taraud se déplace, et enfin du diamètre de l'avant-trou.

Les tarauds dépouillés (fig. 11), à flancs rectifiés, donnent des taraudages précis. Un taraud à avance commandée produit un travail plus correct qu'un taraud avançant par simple vissage.

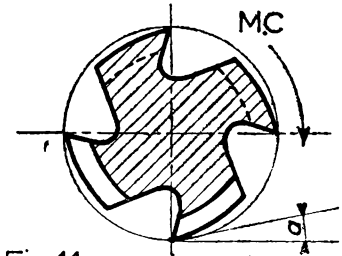


Fig 11 : Section d'un taraud dépouillé

Outil type fraise-mère.

Le taillage de rainures ou de dents d'engrenage à flancs obtenus par génération (forme en développante de cercle en particulier) s'apparente au fraisage de profil et le résultat dépend de la qualité du profil de l'outil, les conditions géométriques de son déplacement par rapport à la pièce étant toujours impératives et liées invariablement à la conception cinématique de la machine (1).

Outil forme couteau.

Le taillage des engrenages par couteau pignon (système Fellow) ou par couteau crémaillère (système Sunderland) s'apparente à l'usinage par outil d'enveloppe à charioter. Le résultat dépend donc encore de la qualité du profil de l'outil, la liaison cinématique pièce-outil devant impérativement engendrer la surface désirée (1).

III. — CHOIX DE LA MACHINE

Ce choix dépend en première approximation de la nature de la surface à réaliser : plan, cylindre, etc., puis de l'étendue de cette surface, en longueur surtout (étau-limeur ou raboteuse par exemple), de la forme de cette surface (fraiseuse pour 2 surfaces planes associées), de la précision recherchée (perçage à la perceuse, alésage au tour ou à l'aléseuse), de la cadence de production (tour ordinaire ou tour automatique), du volume de production (machine classique ou machine spéciale), de l'organisation de la production (machines classiques successives ou machine-transfert à unités d'usinage incorporées), etc.

Quoi qu'il en soit, on peut classer les machines en trois catégories principales : celles qu'on utilise en mécanique générale suivant les besoins du moment, donc machines banales, celles qu'on n'utilise que pour une opération répétée sous la même forme, et celles qu'on ne peut utiliser que pour une opération de façonnage particulière à une pièce déterminée.

---

(1) Ces notions nouvelles de taillage par génération seront reprises dans le chapitre « Travaux de taillage ».

A. MACHINES BANALES OU DE MÉCANIQUE GÉNÉRALE.

Ces machines : tours à charioter et à fileter, fraiseuses universelles, perceuses, raboteuses, étaux-limeurs, rectifieuses, aléseuses, ne reçoivent à priori aucun équipement particulier. On les utilise donc en fonction de leurs possibilités dimensionnelles, de leur commodité d'emploi, de la multiplicité des opérations qu'elles permettent. Leur gamme étendue de vitesses de coupe ou d'avance, l'universalité de l'adaptation des outils les destinent aux ateliers de production courante, aux ateliers d'outillage et d'entretien, aux ateliers de création de prototypes.

En général, ces machines sont chères à l'achat et leur utilisation pour des productions importantes est onéreuse.

B. MACHINES DE PRODUCTION.

Dans ces machines, la chaîne cinématique est simplifiée au maximum, la gamme de vitesses est réduite, la position de la broche ou de l'outil est parfois invariable, les déplacements des chariots sont de faibles courses. Ces possibilités limitées permettent de donner à ces machines une grande robustesse, une entière sécurité de marche et une grande facilité d'emploi.

En général, elles sont d'un faible prix d'achat et leur utilisation pour des productions importantes est économique. De plus, elles ne requièrent qu'une main-d'œuvre de service de basse qualification.

Dans cette catégorie, on peut ranger : les fraiseuses à tête fixe, horizontale ou verticale, les tours d'opération ou de reprise, les tours automatiques...

C. MACHINES A DESTINATION SPÉCIALE.

Elles sont conçues et fabriquées spécialement pour une seule opération à exécuter sur une pièce déterminée. L'outil qu'elles portent est donc invariable et, par suite, on peut le régler préalablement hors de la machine, ce qui lui confère un caractère d'interchangeabilité hautement appréciable. De plus, les vitesses de coupe et d'avance sont aussi invariables et le mécanisme cinématique se trouve très réduit, parfois même le moteur est directement accouplé à la broche ou au dispositif d'avance.

Ces avantages considérables ne sont obtenus que pour des productions pratiquement continues. Les machines peuvent alors être utilisées dans un cycle d'opérations indépendantes les unes des autres ou, au contraire, dans une chaîne de fabrication dite à transfert où tout est synchronisé (fabrication de pièces pour automobiles par exemple).

Dans un cas comme dans l'autre, la production de ces machines est telle que leur amortissement ne grève la fabrication que pour une part infime. Mais leur approvisionnement en pièces et l'évacuation de leur production posent des problèmes de manutention et d'équipement souvent très complexes et onéreux.

IV. — CHOIX DES CONDITIONS DE TRAVAIL

Nous avons déjà parlé du choix de l'outil et du choix de la machine et nous examinerons maintenant l'influence des conditions de travail sur la correction de la surface obtenue et sur le prix de revient de l'opération.

Lorsque le fini de la surface ne présente pas d'exigences particulières et lorsque la tolérance en dimensions est large — c'est le cas de toute passe d'ébauche préalable à la passe dite de finition ou à la passe de rectification, ou au traitement thermique suivi de rectification — il vaut

mieux travailler à plus grande profondeur de passe et à avance normale qu'à faible profondeur de passe (car il faudrait alors prévoir plusieurs passes) et grande avance. La vitesse de coupe permise diminue en effet plus vite avec l'augmentation de l'avance **a** qu'avec l'augmentation de la profondeur **p** $\left(\text{loi du commandant Denis : } V^3a^2p = \text{constante } C, \text{ d'où } V = \sqrt[3]{\frac{C}{a^2p}}\right)$.

Préférer le travail sous arrosage effectif et abondant au travail à sec lorsque le métal façonné le permet.

Lorsque la surface exige des qualités géométriques et dimensionnelles sévères, le travail à l'outil de coupe est suivi d'une rectification à la meule ou d'un grattage à la main.

Dans le cas de rectification à la meule, la passe finale qui la précède peut être exécutée à l'outil d'enveloppe ou à l'outil de forme indifféremment. Dans le cas du grattage, il faut éviter l'outil de forme — lame ou fraise de profil — qui coupe mal ou qui ne taille pas le copeau minimum et qui, par suite, écrouit la surface par plages et la rend de dureté inégale.

Dans le cas d'une finition à l'outil de coupe, il y a intérêt à choisir un outil d'enveloppe à grand arrondi de bec et à adopter une assez grande avance. La surface a ainsi un meilleur aspect.

V. — RESPECT DE LA PRÉCISION IMPOSÉE

La précision se manifeste sous la forme :

— d'une part de la correction géométrique de la surface et de la qualité de son fini et,

— d'autre part, de la position de cette surface par rapport à un élément de référence, c'est-à-dire de sa cote.

En ce qui concerne la correction géométrique, nous avons vu que la qualité des organes de la machine et de l'outil est le critère de base. Quant au fini, il dépend surtout du mode opératoire final adopté qu'on peut classer dans l'ordre croissant suivant : travail à l'outil de forme, à l'outil d'enveloppe, par grattage, à la meule de rectification, par rodage et superfinition.

La cote de la surface ou, plus exactement, l'approche plus ou moins fidèle de la cote théorique, dépend de l'aptitude de la machine et de son outil, c'est-à-dire de la dispersion (variation de la cote pour des conditions de travail inchangées) propre à l'ensemble (1). On obviera à l'importance de cette dispersion en jouant sur les principaux facteurs qui la provoquent. Nous citerons ici : l'échauffement de la pièce, l'usure de l'arête coupante de l'outil et les déformations de l'outil ou de la pièce et de leurs supports comme étant les plus influents.

A. ÉCHAUFFEMENT DE LA PIÈCE.

La chaleur provoquée par la coupe du métal doit se disperser par la pièce, par l'outil, par le lubrifiant. L'échauffement de la pièce est parfois tel qu'après refroidissement et nouvel équilibre interne, la surface façonnée se trouve incorrecte. La figure 12 montre la déformation due à l'exécution d'une rainure avec échauffement excessif.

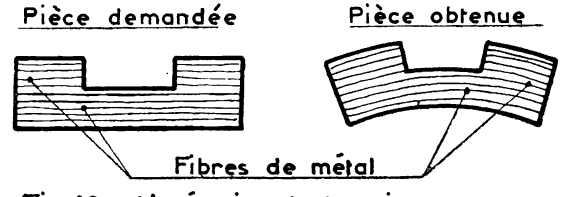


Fig 12 : L'exécution de la rainure engendre une déformation de la pièce

(1) Voir contrôle statistique : Organisation industrielle, tome II, par A. Castell (Éditions Desforges) et 1re partie de Technologie générale, classe de 1re.

Il est donc souvent nécessaire de prévoir entre les passes d'ébauche ou avant la passe de finition une stabilisation par refroidissement naturel ou même par recuit.

B. DÉTÉRIORATION DE L'OUTIL.

Un outil qui ne coupe plus est impropre à la fabrication. Il provoque le plus souvent une augmentation de l'effort de coupe et, par suite des déformations qui l'accompagnent, un échauffement excessif de la pièce, un arrachement de métal et un écrouissage de la surface ou un broutement important.

Il faut donc que l'outil soit remplacé périodiquement et il est bon d'imposer la période pour que le stade de la détérioration ne soit pas atteint.

C. DÉFORMATIONS DUES A L'EFFORT DE COUPE.

Il est impossible de les supprimer totalement, mais on peut les réduire dans l'esprit de ce qui suit :

1° Diminution de l'effort de coupe.

On peut l'obtenir :

— en détachant un copeau de faible section;

— en utilisant des outils parfaitement affûtés;

— en retardant l'usure de l'arête coupante par un arrosage abondant et par l'emploi d'outils de haute qualité (acier rapide supérieur et carbures métalliques).

2° Diminution des déformations dues à la pièce.

On peut l'obtenir :

— en diminuant le porte-à-faux par un ablocage aussi rapproché que possible de l'outil (fig. 13) ou en supportant la pièce par une lunette (fig. 14);

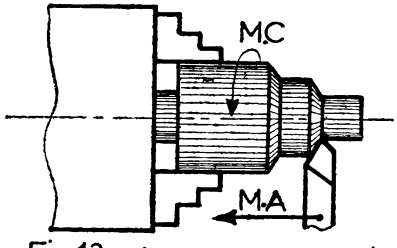


Fig13 : Le serrage est fait sur le collet de la pièce et très près de l'outil

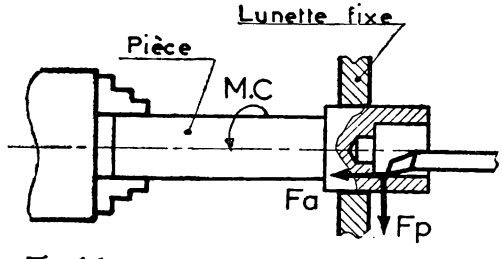


Fig14 : La lunette empêche la déformation de la pièce sous les différents efforts de coupe

— en interposant des supports supplémentaires équilibrant l'effort de coupe comme l'indique la figure 15;

— en liant les pièces ou leurs supports très rigidement aux organes porte-broche;

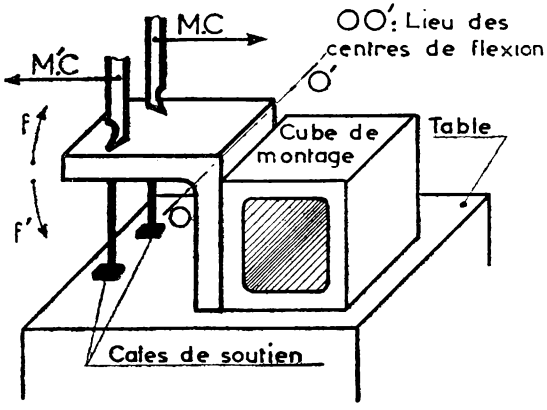


Fig15 : Suivant le sens du mouvement de coupe, l'outil a une trajectoire relative :
- engageante pour M.C, flèche f
- dégageante pour M'C, flèche f'

Les cales de soutien empêchent la flexion de la pièce.

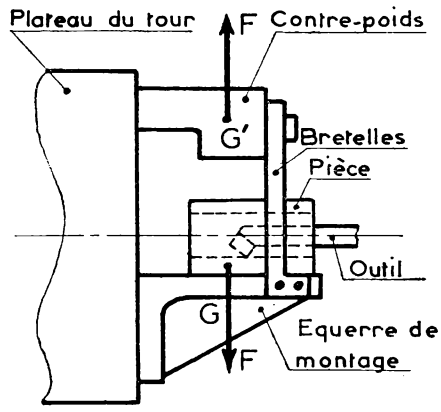


Fig16: L'ensemble est équilibré et les actions centrifuges F égales sont liées par deux bretelles.

— en équilibrant statiquement et dynamiquement les systèmes tournants comme pour le montage en plateau (fig. 16);

— en assurant une liaison rigide entre deux actions opposées par l'adjonction de tirants ou de bretelles (fig. 16);

— en utilisant des porte-pièces indéformables sous les efforts de bridage;

— en abloquant les pièces de telle sorte que les pressions d'appui s'exercent au droit des points d'assise (fig. 17) car toute déformation provenant de l'ablocage disparaîtrait après démontage et se reporterait obligatoirement sur la surface façonnée.

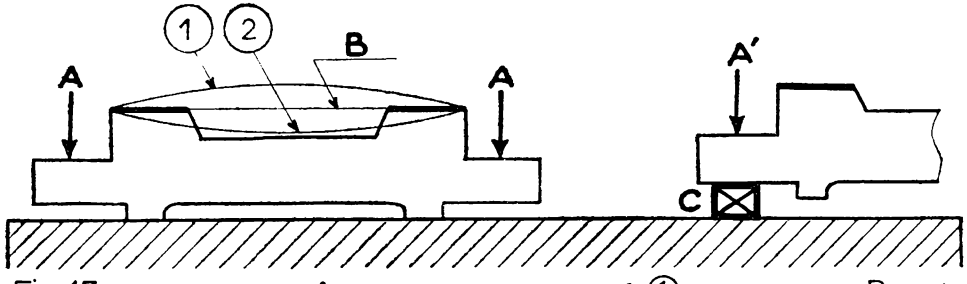


Fig 17-Le serrage en A provoque la convexité ① de la surface B mais, après surfaçage plan et desserrage, cette surface devient concave ②. Le calage en C, opposé à A', élimine les déformations.

3° Diminution des déformations dues à l'outil.

On l'obtiendra :

— en donnant au corps de l'outil la section maximum compatible avec son support;

— en orientant la section de telle sorte que son moment d'inertie soit maximum, compte tenu de la direction de l'effort de coupe;

— en diminuant au maximum le porte-à-faux de l'outil par rapport à son support principal;

— en donnant à l'outil une forme telle que sa trajectoire élastique sous l'action de l'effort de coupe soit dégageante ou en disposant la pièce de telle sorte que l'attaque de l'outil se fasse sur une zone exempte de flexion (fig. 15);

— en réglant les jeux des chariots en mouvement et en bloquant en position ceux qui n'ont pas à se déplacer;

— en assurant la liaison directe entre le support de pièce et le support d'outil pour que la rigidité de l'ensemble soit totale : emploi de bretelles reliant la console à la tête porte-broche pour le fraisage par exemple;

— en guidant l'outil au voisinage de l'effort de coupe : guide de perçage ou de barre d'alésage par exemple.

VI. — ORDRE DES PHASES DE FABRICATION

C'est l'ordre des phases de fabrication qui constitue ce que l'on appelle généralement la gamme de fabrication.

Les données du problème étant posées, c'est-à-dire :

— nature et état de la pièce à obtenir parfaitement établis par le dessin de définition;

— importance de la production envisagée;

— délai de fabrication et cadence des livraisons;

— prix de revient à ne pas dépasser,

on peut imaginer autant de gammes de fabrication qu'on le désire, différant entre elles par l'ordre des phases, par les procédés d'obtention ou d'usinage, par les machines et les outils utilisés, par le cycle de manutention, par l'automaticité des opérations.

Il est donc difficile d'énoncer des règles universellement valables et nous nous contenterons dans ce préambule de donner quelques principes élémentaires relatifs à l'usinage.

Il est inutile de multiplier le nombre de passes pour une même opération, ou de changer de poste de travail ou de machine, ou de changer d'outil ou, en cours d'opération, de modifier les conditions de marche de la machine. Les **temps morts** relatifs aux manutentions, aux réglages, aux manipulations de tous ordres grèvent en effet le prix de revient d'une très lourde part et il convient de les réduire au maximum. Cependant, il ne faut pas oublier que :

— une ébauche à grand débit peut occasionner des déformations et il faut alors attendre la stabilisation de la surface pour en juger la correction géométrique ou pour procéder à la passe de finition;

— un traitement thermique, trempe en particulier, s'accompagne toujours de déformations et doit être suivi d'une opération de rectification;

— la réserve d'une partie non trempée après cémentation nécessite l'enlèvement de la couche cémentée avant de procéder à la trempe ;

— pour une pièce tournante non équilibrée, la modification de la vitesse de rotation et des éléments de coupe entre l'ébauche et la finition entraîne immanquablement un déplacement et une déformation de la surface façonnée et que le réglage doit être corrigé en conséquence ;

— pour obtenir les qualités 8 ou 9, il suffit d'une seule passe si la portée à usiner est très courte, il faut faire suivre la passe d'ébauche d'une passe de finition dans le cas contraire. On peut se contenter d'utiliser un outil à charioter, un outil de forme rectifié, une fraise de face ou un foret aléseur ;

— pour obtenir la qualité 7, il suffit d'une seule passe à l'outil si la portée est extrêmement courte. Il faut obligatoirement faire suivre la passe d'ébauche d'une passe de finition dans le cas contraire. Pour cette passe de finition, on ne peut utiliser l'outil de coupe que pour une qualité de fini tout à fait moyenne et que si l'équipement pièce et outil est parfaitement rigide. Pour un bon fini et pour une grande homogénéité de fabrication, il faut avoir recours à la meule de rectification ou à l'alésoir finisseur ;

— pour obtenir la qualité 6 et en-deçà, il devient absolument nécessaire de prévoir une ébauche à l'outil, une semi-finition à l'outil ou à la meule de rectification, une finition à la meule de rectification fine ou par rodage.

VII. — ORGANISATION DE LA PRODUCTION

Suivant l'importance de la production, la fabrication sera dite :

— **unitaire** pour un petit nombre de pièces à obtenir. Il faudra alors utiliser au maximum les outils d'enveloppe courants, si possible normalisés, et les machines banales de mécanique générale ;

— **en série** pour un assez grand nombre de pièces à obtenir et généralement pour un renouvellement périodique de la production. Il faudra alors créer des montages d'usinage permettant l'homogénéité de fabrication et la réduction des temps morts ;

— **en chaîne ou continue** pour un nombre très élevé de pièces à obtenir et pour une production pratiquement ininterrompue. Il faudra dans ce cas créer des outils spéciaux facilement amovibles et réglables hors de la machine et prévoir des machines tout à fait spéciales ou des têtes d'usinage tenant lieu de machines élémentaires et exécutant sur une chaîne à transfert automatique des opérations aussi simples que possible.

LES TRAVAUX DE SURFAÇAGE PLAN

Le rabotage

I. — PRINCIPE DU RABOTAGE

La génération du plan par rabotage est obtenue par outil de forme ou par outil d'enveloppe (fig. 18). Les outils courants utilisés sont représentés par la figure 19.

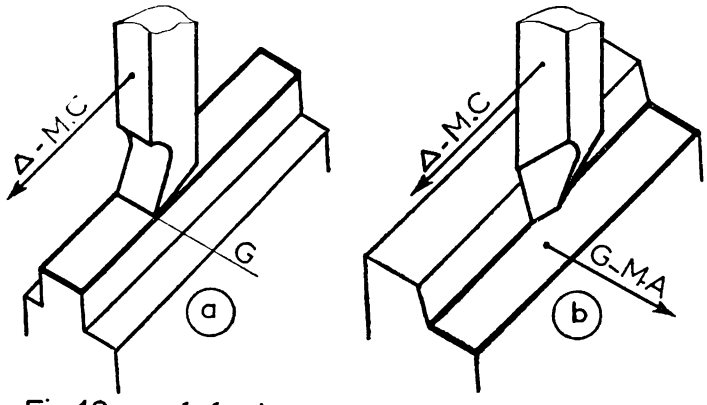


Fig 18 – Génération du plan.
G : génératrice , Δ : directrice
(a) à l'outil de forme - (b) à l'outil d'enveloppe.

La coupe a lieu seulement pendant le mouvement aller ou **mouvement de coupe MC** (fig. 20). La **course C** est égale à la longueur de la pièce augmentée des distances **e** nécessaires à l'attaque et à l'échappée de l'outil. Une course aller et une course retour constituent un **battement ou une période.**

Du fait du retour à vide de l'outil, il y a une perte de temps évaluée par le rapport :

$$r = \frac{t_r}{t_a} = \frac{\text{temps de retour}}{\text{temps d'aller}}$$

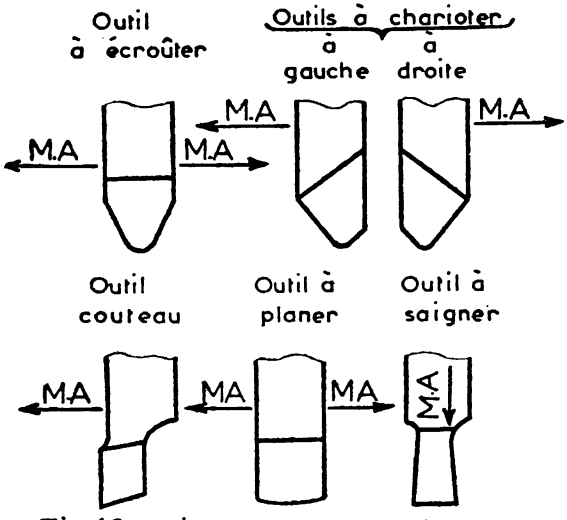


Fig 19 – Outils courants de rabotage.

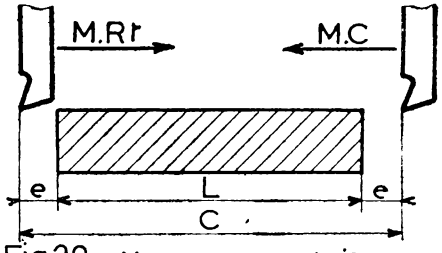


Fig 20 – Mouvements relatifs à la course et à la période d'un outil de rabotage.

Les machines à raboter ont donc un rendement faible, comparativement à celui des machines à mouvement de coupe continu.

La vitesse de coupe de l'outil est $\mathbf{V}m/mn = \frac{\mathbf{CN}(1 + \mathbf{r})}{1\,000}$ (1) dans lequel $\mathbf{N}$ = nombre de périodes dans une minute. Si $\mathbf{t}_r = \mathbf{t}_a$ on a $(1 + \mathbf{r}) = 2$ et $\mathbf{V}m/mn = \frac{2\mathbf{CN}}{1\,000}$, relation approchée mais qui peut être appliquée pour les petites courses.

MACHINES A RABOTER

Selon leur conception on distingue les étaux-limeurs, les raboteuses et les mortaiseuses.

I. — ÉTAU-LIMEUR (Fig. 21).

C'est la machine la mieux adaptée pour le rabotage des pièces de petites et moyennes dimensions. L'outil reçoit le mouvement de coupe et de réglage, la pièce le mouvement d'avance.

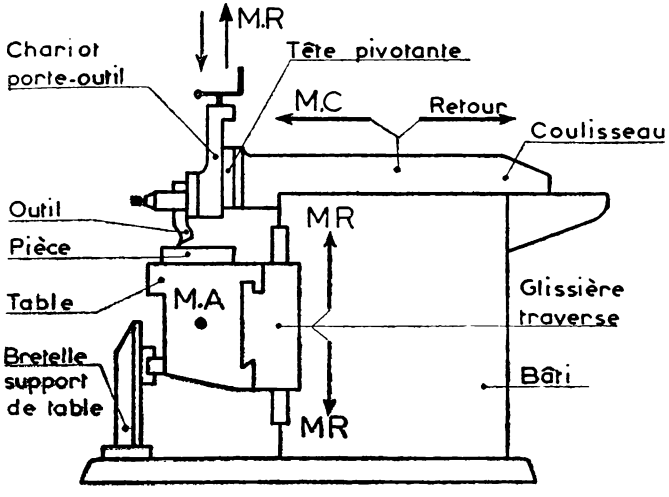


Fig 21: Etau-limeur - M.C: mouvement de coupe M.A: mouvement d'avance - MR mouvement de réglage

A. TÊTE PORTE-OUTIL

La surface à raboter peut occuper dans l'espace une position horizontale, verticale ou oblique.

Pour le rabotage horizontal, si l'outil conserve au retour la même position que pendant l'aller (fig. 22-1)

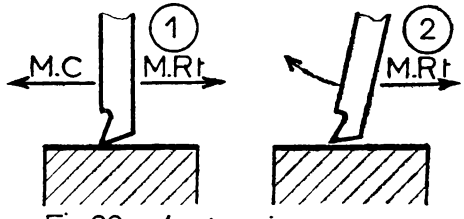


Fig 22 - L'outil doit se relever vers l'avant pendant le retour.

son arête coupante frotte exagérément sur la surface usinée et se trouve rapidement détériorée. Le battant, par rotation autour de son axe de suspension (fig. 23) permet à l'outil de se relever vers l'avant (fig. 22-2) ce qui atténue considérablement le frottement.

---

(1) Voir classe de 2e, leçon n° 27.

Pour supprimer tout contact de l'outil avec la pièce pendant le mouvement de retour, on peut adopter le dispositif de relevage automatique de la figure 24.

Pendant la course travail, le secteur oscillant solidaire du coulisseau adhère au-dessus du bâti et en tournant suivant la flèche f_t, appuie le battant contre la chape (fig. 24-1).

Au début de la course retour (fig. 24-2) le secteur est renvoyé suivant la flèche f_r et l'outil se soulève. Une butée fixe limite la course du secteur.

Pour le rabotage vertical ou oblique (fig. 25-1, 2, 3) l'avance est donnée par le chariot porte-outil. Le battant doit donc pouvoir s'incliner afin que l'arc décrit par le bec pendant son retour ne soit pas dans le plan de la surface usinée. Cette inclinaison α du battant est assurée par pivotement de la chape porte-battant (revoir fig. 23).

Pour le rabotage oblique (fig. 25-3) l'angle d'inclinaison β du chariot porte-outil, qui est l'angle d'inclinaison de la surface sur la verticale s'obtient par pivotement de l'ensemble de la tête porte-outil sur le coulisseau (revoir fig. 23).

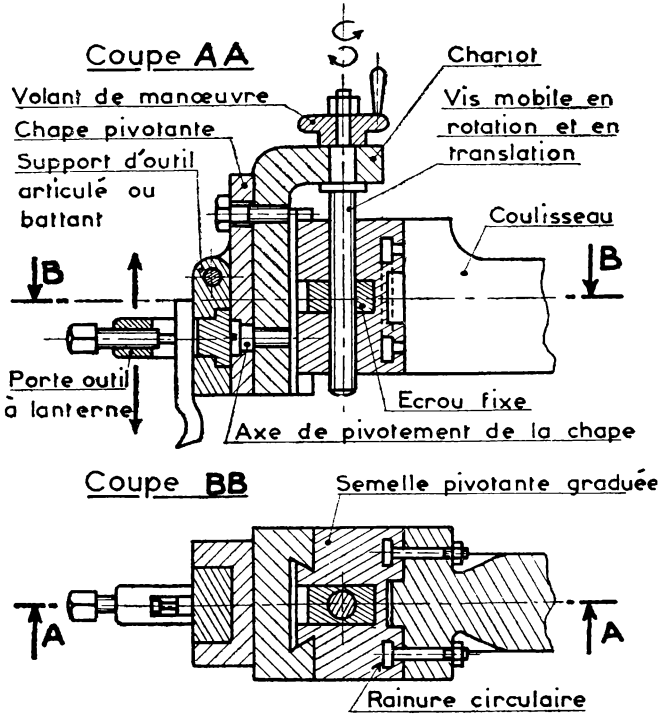


Fig23: Tête porte-outil de l'étau-limeur

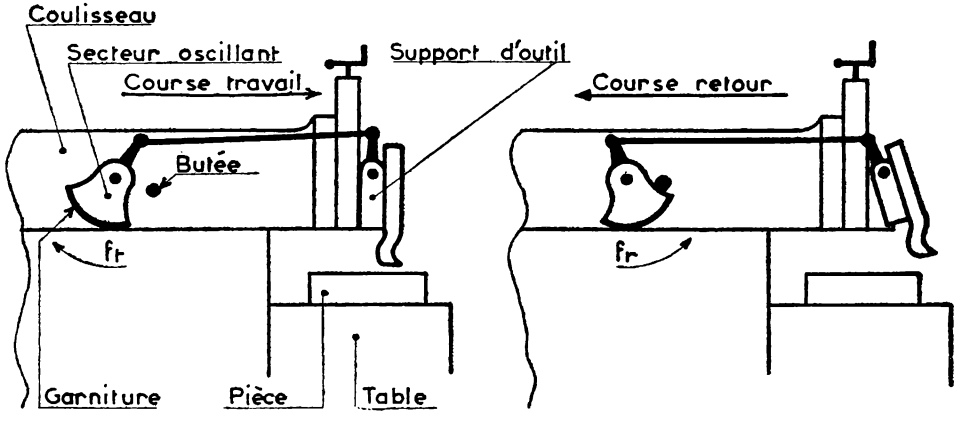


Fig24: Dispositif de relevage automatique de l'outil

Remarque. — Le rabotage oblique par inclinaison de la tête porte-outil ne peut se faire que pour de faibles hauteurs des pièces. Pour le rabotage des grandes surfaces, certains étaux-limeurs possèdent une table pivotante dont l'angle d'inclinaison est mesuré par une graduation

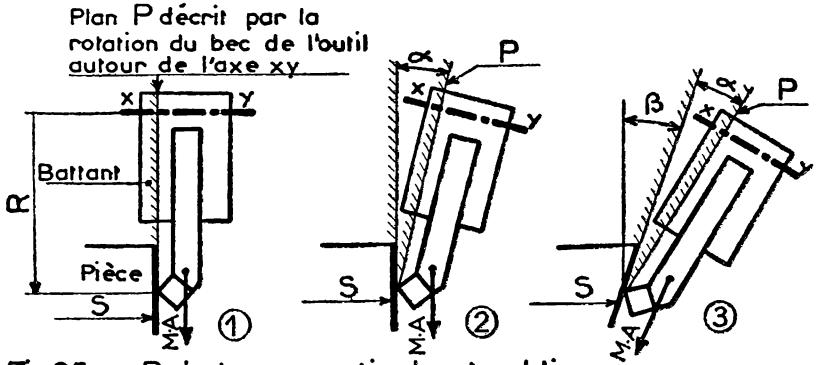


Fig25 Rabotage vertical et oblique.
① xy ⊥ S : les plans P et S sont confondus, l'outil frotte fortement sur toute la largeur de la pièce pendant son retour
② et ③ xy ∠ S : l'outil peut se dégager de la pièce pendant son retour.

circulaire (fig. 26). La table tourne autour d'un axe horizontal fixé à une semelle qui glisse sur la traverse. A défaut de table pivotante on peut monter la pièce dans un montage qui lui assure l'inclinaison voulue α sur l'horizontale (fig. 27).

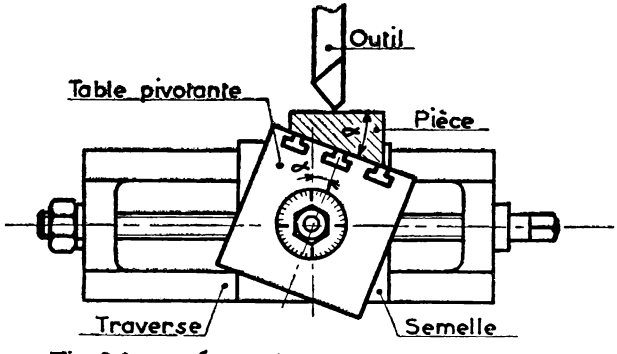


Fig.26: Schéma d'une table pivotante

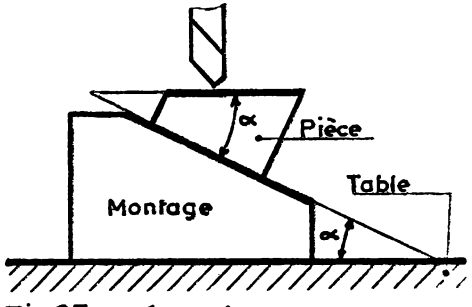


Fig.27: Schéma d'un montage pour rabotage incliné sur l'horizontale.

II. — RABOTEUSE

Cette machine est conçue pour le rabotage des pièces lourdes et encombrantes. C'est à la table porte-pièce qu'est donné le mouvement de coupe, l'outil reçoit les mouvements d'avance et de réglage.

Lorsque les pièces sont larges, on utilise une raboteuse à un montant (fig. 28). Les chariots porte-outils de raboteuses ont les mêmes particularités que ceux d'étaux-limeurs.

A. AVANTAGES DE LA RABOTEUSE SUR L'ÉTAU-LIMEUR

1° Chariots porte-outils multiples.

Deux chariots porte-outils sont montés sur la traverse et un sur chaque montant, ce qui permet l'usinage simultané de plusieurs surfaces planes (fig. 29).

2° Coupe dans les deux sens.

La table et la pièce forment un ensemble de grande inertie et le mouvement de retour est plus lent que pour le coulisseau de l'étau-limeur. Pour éviter la perte de temps ainsi causée, on peut placer sur la traverse quatre chariots opposés deux à deux permettant la coupe dans les deux sens (fig. 30).

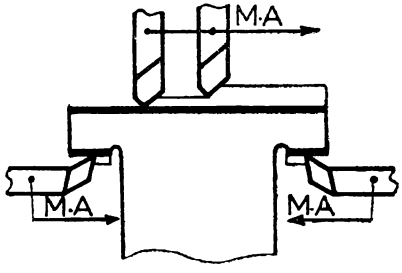


Fig.29: Usinage simultané de trois surfaces planes sur raboteuse à deux montants

3° Coupe à vitesse uniforme.

Nous avons donné (fig. 373, 1re partie, classe de 1re) le diagramme des vitesses et des espaces de la tête de la bielle-balancier liée au coulisseau d'un étau-limeur. La figure 31 reproduit ce diagramme et donne celui de la table d'une raboteuse.

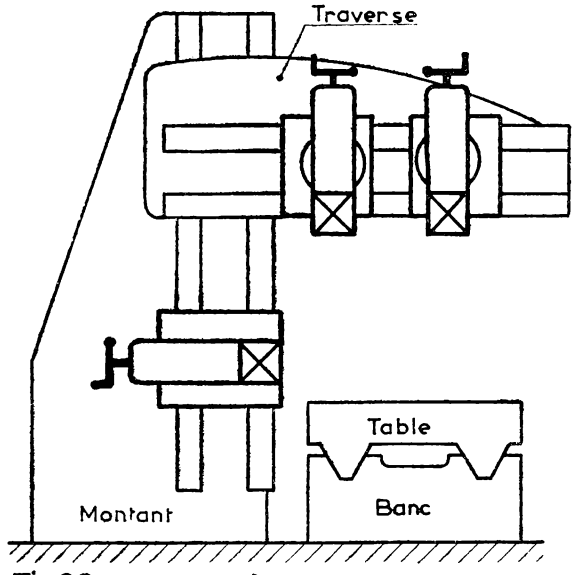


Fig.28: Raboteuse à un seul montant et à trois porte-outils

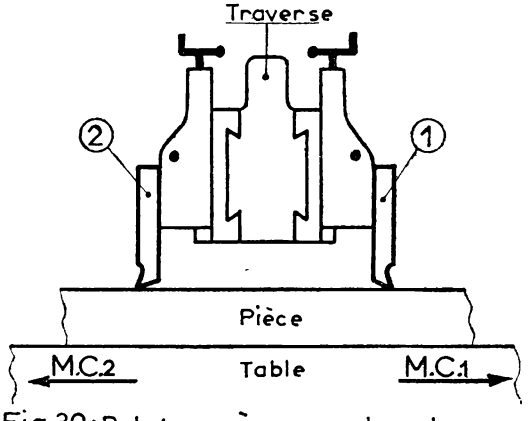


Fig.30: Raboteuse à coupe dans les deux sens. Sens M.C.1 : l'outil ① coupe et l'outil ② se relève. Sens M.C.2 : l'outil ② coupe et l'outil ① se relève

La comparaison montre que la coupe de l'étau-limeur se fait à vitesse variée, tandis que celle de la raboteuse est à vitesse uniforme. L'accélération et la décélération de la table se situent en effet dans les périodes correspondant aux temps d'attaque et d'échappée de l'outil. C'est ce qui assure une meilleure tenue de coupe à l'outil de la raboteuse qu'à celui de l'étau-limeur.

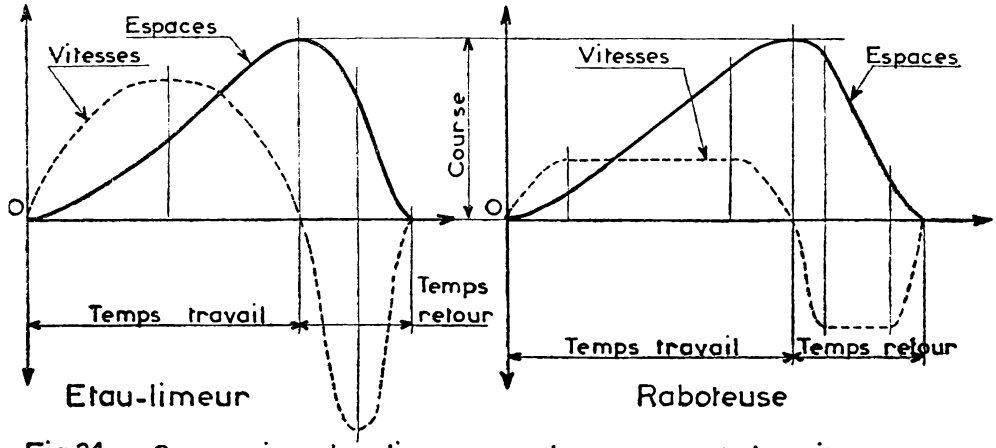


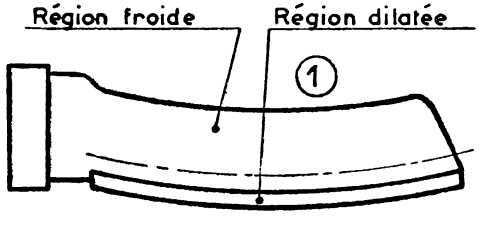
Fig.31 : Comparaison des diagrammes des espaces et des vitesses du coulisseau de l'étau-limeur et de la table de la raboteuse

B. COMPARAISON DE LA PRÉCISION DE LA RABOTEUSE ET DE CELLE DE L'ÉTAU-LIMEUR

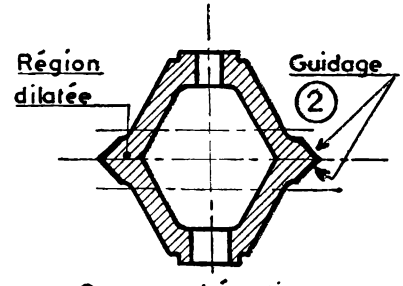
La précision de la raboteuse est plus grande que celle de l'étau-limeur pour les raisons suivantes :

— la table repose sur des guidages plus longs que sa propre longueur, ce qui lui assure une bonne assise sur le banc;

— la traverse porte-outils, liée aux montants, forme un ensemble rigide alors que pour l'étau-limeur le porte-outil est en porte-à-faux à l'extrémité du coulisseau. De plus ce porte-à-faux augmente avec l'augmentation de la course;



Coulisseau ancien déformé



Coupe schématique d'un coulisseau moderne

Fig.32 : Effet de la chaleur sur le coulisseau d'un étau-limeur

— Le banc, massif, absorbe facilement la chaleur dégagée par le travail, tandis que pour l'étau-limeur, la région inférieure du coulisseau (fig. 32-1) s'échauffe plus que la région supérieure en partie refroidie par son séjour dans l'air. Il s'ensuit une déformation illustrée par la figure 32-1.

Pour les coulisseaux récents (fig. 32-2) la dilation se manifeste dans la région des fibres neutres centrales du solide et les surfaces de guidage conservent leur rectitude.

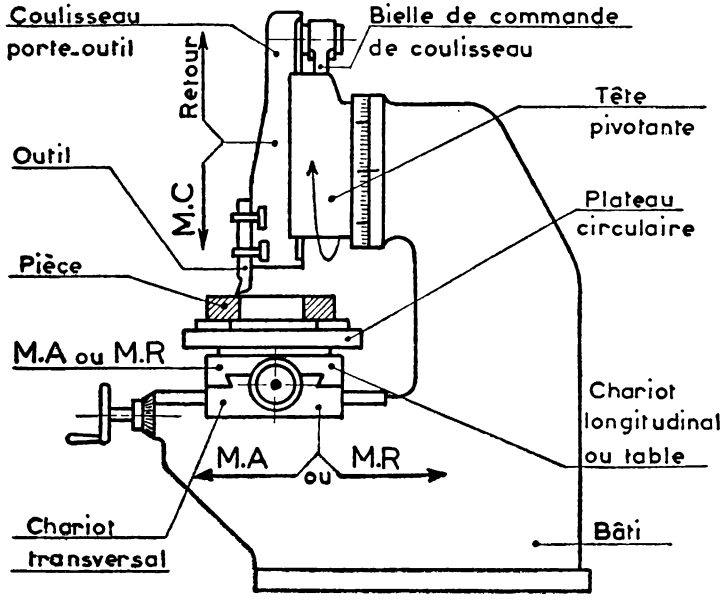


Fig 33 : Mortaiseuse

III. — MORTAISEUSE

La mortaiseuse (fig. 33) est adaptée spécialement pour le rabotage vertical. Comme pour l'étau-limeur, l'outil reçoit le mouvement de coupe, la pièce les mouvements d'avance et de réglage.

En supposant que la vitesse du mouvement *retour* soit égale à celle du mouvement *aller*, la vitesse de coupe est donc :

$$Vm/mn = \frac{2CN}{1\,000}$$

TÊTE-PORTE-OUTIL

Pour autoriser le mortaisage oblique, la tête est orientable sur une semelle graduée.

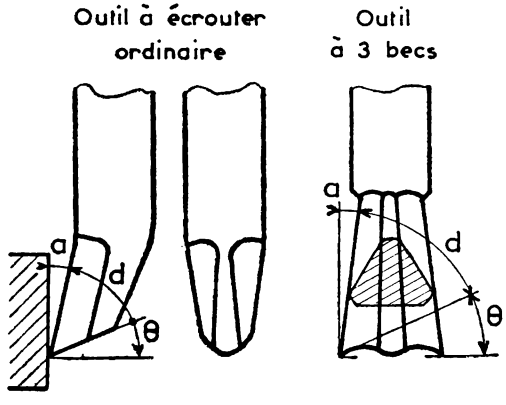


Fig.34 : Outils à charioter pour mortaiseuse.

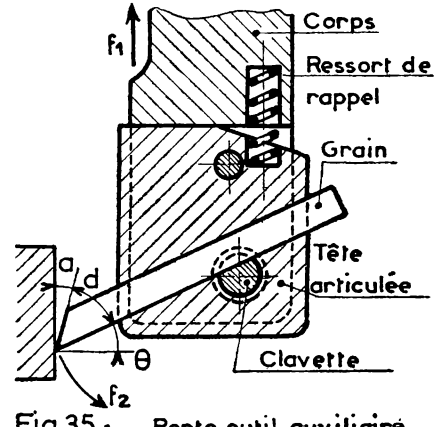


Fig.35 : Porte-outil auxiliaire articulé d'une mortaiseuse.

L'observation de la figure 33 montre que la conception du coulisseau porte-outil ne permet pas à l'outil de s'effacer pendant son retour. Il est donc soumis à un frottement sous forte pression qui effrite son arête coupante et détériore la surface usinée. De plus, le mouvement d'avance ne peut avoir lieu que si l'outil est dégagé en fin de course retour.

La figure 34 représente des outils courants de chariotage. La figure 35 montre un porte-outil auxiliaire articulé qui évite le forgeage de l'outil et qui réduit son frottement sur la pièce pendant la course retour grâce à l'effacement permis par le ressort.

OBSERVATIONS SUR LES TRAVAUX DE RABOTAGE

I. — RÉGLAGE DE LA TÊTE PORTE-OUTIL DE LA RABOTEUSE ET DE L'ÉTAU-LIMEUR

A. POUR LE RABOTAGE VERTICAL

La tête porte-outil étant pivotante sur le coulisseau, ne pas se contenter d'un réglage d'après la graduation de la semelle pivotante. Cette graduation manque de précision et l'imprécision est accentuée par les erreurs de visée. Il faut donc régler la perpendicularité du chariot sur la table en contrôlant sa trajectoire au moyen d'une équerre de précision ou d'un cylindre de vérification et d'un comparateur (fig. 36-1).

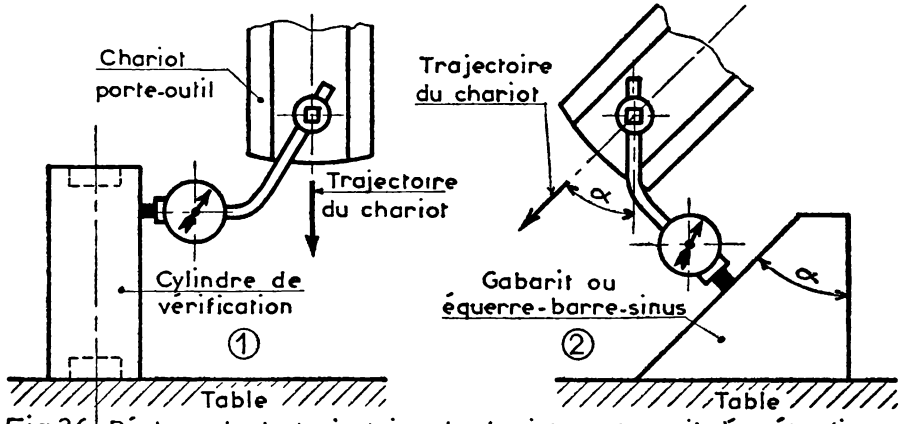


Fig.36: Réglage de la trajectoire du chariot porte-outil d'un étau-limeur ou d'une raboteuse. ① Perpendiculaire à la table ② Oblique à la table

B. POUR LE RABOTAGE OBLIQUE

Pour les mêmes raisons que précédemment, régler l'inclinaison du chariot à l'aide d'un gabarit d'angle α et d'un comparateur (fig. 36-2).

II. — RÉGLAGE DE L'OUTIL

Pour le rabotage horizontal, il est évident que la profondeur de passe finale peut être contrôlée par le vernier fixé sur la vis de commande du chariot. Pour le rabotage oblique, c'est le mouvement donné à la table qui détermine obliquement la profondeur de passe et le contrôle par le vernier solidaire de la vis de la table devient imprécis et nécessite des calculs.

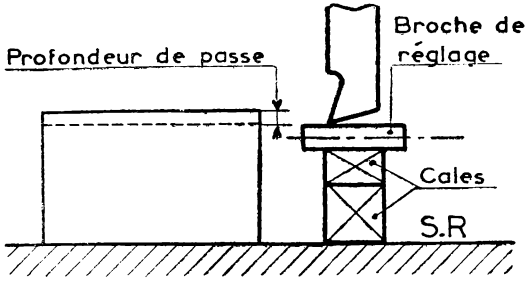


Fig.37: Réglage de l'outil à l'aide de cales et broche

Le réglage précis peut être obtenu :

A. PAR CALES ET BROCHE

La passe finale est réglée par rapport à une face de référence (pièce ou table) au moyen de cales et d'une broche (fig. 37). La broche, de 3 à 4 *mm* de diamètre doit passer à frottement doux entre le bec de l'outil et les cales.

Les cales peuvent être remplacées par un bloc prismatique de hauteur déterminée.

B. PAR GABARIT ET BROCHE

Pour régler l'outil en vue de lui faire décrire successivement les contours de la pièce avec précision on utilise la combinaison gabarit et broche (fig. 38). Le gabarit est monté à l'arrière de la pièce. La surépaisseur représentée par la broche interposée successivement met le gabarit à l'abri des coups d'outil involontaires.

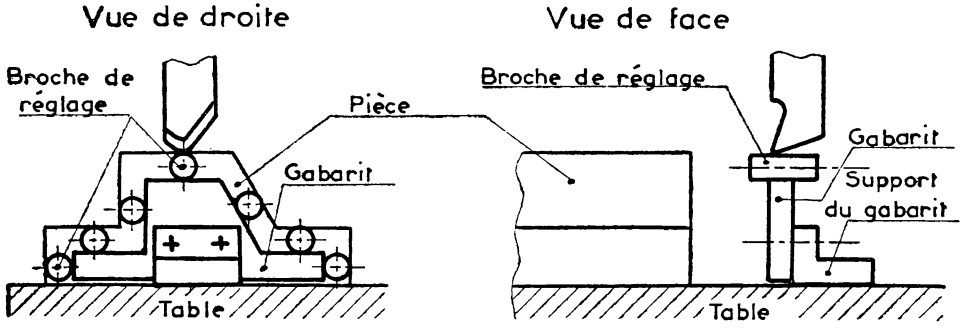


Fig.38: Réglage de l'outil à l'aide de gabarit et d'une broche

III. — DISPOSITION DE LA PIÈCE PAR RAPPORT AU MOUVEMENT DE COUPE

Pour être plus économique, le rabotage doit se faire dans le sens de la longueur de la pièce (fig. 39) à condition bien entendu qu'aucun obstacle ne s'y oppose — talon par exemple. Dans le cas de la figure, pour une avance par coup **a**, le nombre d'échappées d'attaque et le nombre d'échappées de sortie sont égaux à $\frac{\mathbf{l}}{\mathbf{a}}$.

Si le rabotage était pratiqué dans le sens de la largeur, pour une longueur $\mathbf{L} = \mathbf{nl}$, il y aurait **n** fois plus d'échappées où l'outil se déplace sans couper, donc **n** fois plus de temps perdu.

Les longueurs d'échappées doivent être le plus courtes possibles : à l'étau-limeur, 15 *mm* pour l'attaque et 10 *mm* pour la sortie sont suffisantes. On a donc $\mathbf{C} = \mathbf{L} + 25$ *mm*.

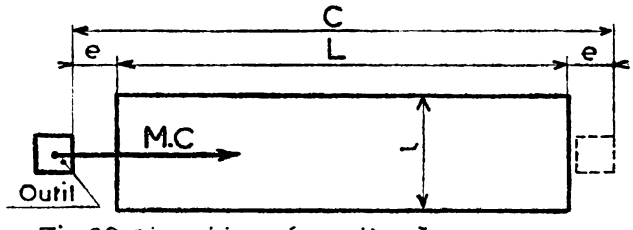


Fig.39: Disposition d'une pièce à raboter par rapport au mouvement de coupe

ÉTAT D'UNE SURFACE RABOTÉE

Nous rappelons que les défauts microgéométriques qui caractérisent l'état d'une surface rabotée sont d'autant plus faibles que (fig. 40) :

— que l'angle d'obliquité du profil et l'avance sont faibles;

— que l'arrondi du bec de l'outil est plus accentué.

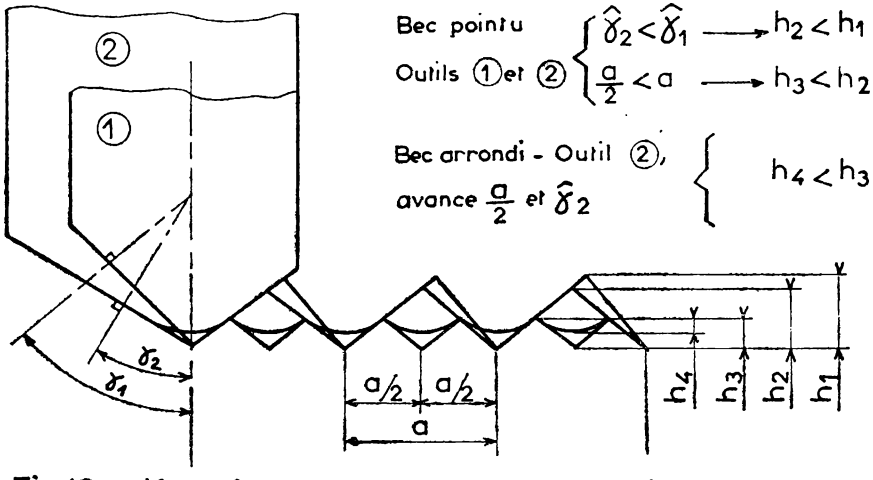


Fig.40: L'état d'une surface rabotée varie d'après la valeur de l'angle d'obliquité de profil de l'outil, la grandeur de l'avance et la forme du bec de l'outil.

Le fraisage

PRINCIPE DU FRAISAGE

Le fraisage engendre un plan par combinaison de la rotation d'un outil à arêtes coupantes multiples et de la translation de la pièce. L'opération peut être réalisée par :

FRAISAGE DE PROFIL (fig. 41-1).

Chaque arête coupante est en réalité un outil de forme et, par rotation autour de l'axe et déplacement de la pièce par translation rectiligne, la surface engendrée est un plan.

FRAISAGE DE FACE (fig. 41-2).

La succession de circonférences décrites par chaque dent de la fraise en rotation est un plan lorsque l'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface fraisée et lorsque la pièce se déplace perpendiculairement à l'axe de la fraise.

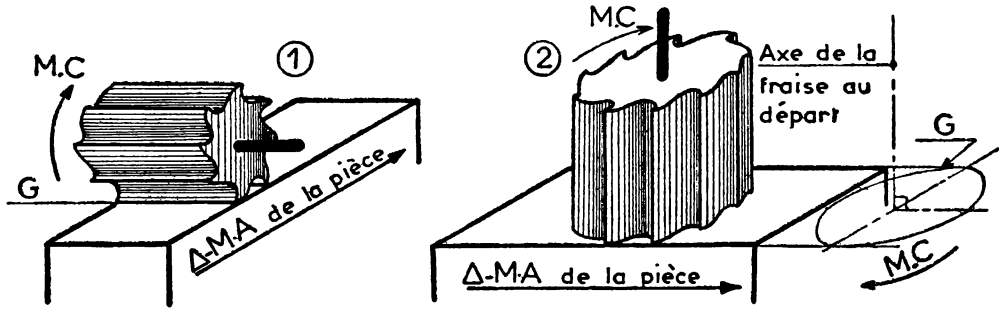


Fig.41 : Réalisation du plan par rotation et translation
① Fraisage de profil ② Fraisage de face

La coupe, qui est continue, a lieu à une vitesse donnée par la relation $Vm/mn = \frac{\pi DN}{1\,000}$ où **D** est le diamètre de la fraise et **N** son nombre de tours par minute.

I. — FRAISES DE PROFIL

Ce sont généralement des fraises à une taille à trou lisse et à entrée de clavette (fig. 42-1) ou à deux tailles et à trou fileté (fig. 42-2).

On dit que la **denture est fraisée** lorsque la taille des dents est obtenue entièrement par fraisage. La denture est le plus souvent hélicoïdale mais elle peut aussi être droite, c'est-à-dire disposée suivant une génératrice rectiligne.

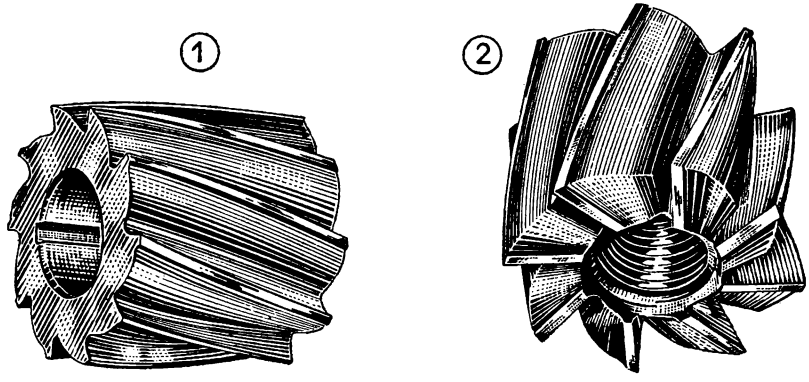


Fig. 42 - Fraises de profil
① - à une taille à trou lisse
② - à deux tailles à trou fileté

A. FRAISAGE A LA FRAISE A TAILLE DROITE (fig. 43).

Au cours du travail, l'épaisseur du copeau croît de **a** en **b** et l'effort de coupe varie dans le même sens. Pour que cet effort, qui est périodique ne soit jamais nul, ce qui provoquerait des à-coups, il faut qu'une dent attaque avant que la précédente quitte le métal. Pour des dents très rapprochées, la composition de ces efforts périodiques conduirait à un effort de coupe à peu près uniforme.

Mais des dents très rapprochées rendent l'affûtage difficile. De plus, les entre-dents trop petits n'acceptent que des copeaux peu volumineux. Il faut donc réduire l'avance à sa valeur la plus faible, ce qui tend à laisser trop longtemps sous la dent une épaisseur inférieure au copeau minimum et provoque l'usure prématurée de la fraise.

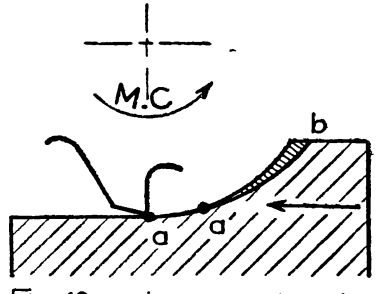


Fig. 43 : Action d'une dent de fraise à taille droite. Entre a et a', le copeau minimum n'est pas obtenu.

B. FRAISAGE A LA FRAISE A TAILLE HÉLICOIDALE

L'angle α est l'angle d'inclinaison de l'hélice (fig. 44).

L'effort de coupe $\mathbf{F}'_c$ se décompose en **T** qui est l'effort tangentiel et en **P** qui est l'effort axial. Ce dernier effort est équilibré par la butée ou la contre-butée de la broche. Pour annuler l'effet de l'effort **P**, on accouple deux fraises de sens d'hélice opposés mais de même pas (fig. 45).

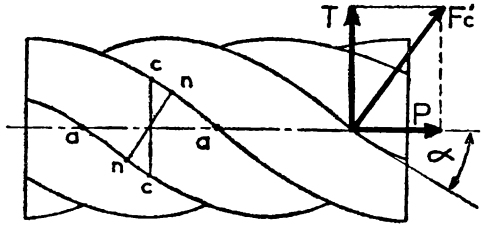


Fig.44: Fraise à taille hélicoïdale

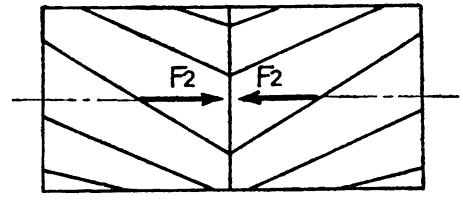


Fig.45: Les 2 efforts axiaux F2 s'équilibrent

Considérons une seule dent au travail (fig. 46).

Lorsqu'elle attaque au point **a** l'effort commence. Il croît jusqu'en $\mathbf{a_1c}$ parce que la longueur d'hélice au contact de la pièce augmente et que l'épaisseur du copeau augmente. De $\mathbf{a_1c}$ à $\mathbf{c_1b}$ il croît encore parce que l'épaisseur du copeau augmente encore. A partir de $\mathbf{c_1b}$, l'effort décroît, du fait de la diminution de la longueur d'hélice en contact, pour s'annuler en $\mathbf{b_1}$.

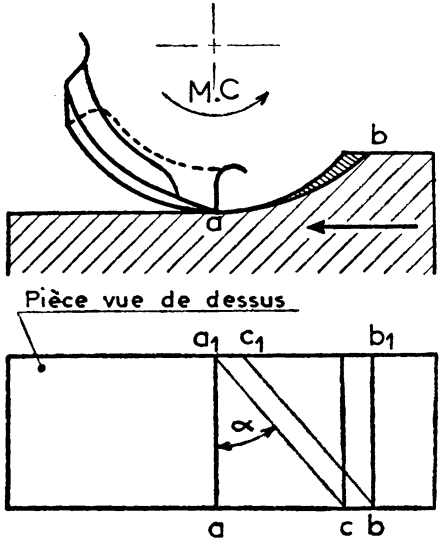


Fig.46: Action d'une dent de fraise à taille hélicoïdale.

On voit donc que les efforts varient très progressivement depuis l'attaque de la dent en **a** jusqu'à sa sortie en $\mathbf{b_1}$, c'est-à-dire sur une longueur d'arête plus longue qu'avec la taille droite.

Pour que l'effort soit pratiquement constant, il faudrait que la largeur de la pièce reçoive plusieurs dents simultanément, c'est-à-dire soit multiple du **pas axial** de denture $\mathbf{P}_a = \overline{\mathbf{aa}}$, distance mesurée sur la génératrice de la fraise (fig. 44).

Cette condition sera remplie d'autant plus facilement que le pas axial sera petit. Cependant, l'angle d'hélice $\alpha = 30°$ donne déjà un pas axial assez important. Il faut en effet que le copeau s'écoule facilement dans l'entre-dent et que le **pas normal** $\mathbf{P}_n$, c'est-à-dire la distance $\overline{\mathbf{nn}}$ comptée normalement à l'inclinaison de l'hélice, soit suffisant (fig. 44).

Le nombre de dents de la fraise détermine le **pas circonférentiel** $\mathbf{P}_c$, soit la distance $\overline{\mathbf{cc}}$ mesurée sur la circonférence extérieure.

Les différents pas sont liés par les relations :

$$\frac{\mathbf{P}_a}{\mathbf{P}_c} = \cot \alpha ; \qquad \frac{\mathbf{P}_n}{\mathbf{P}_c} = \cos \alpha$$

Remarques. — 1° En réalité, l'effort de coupe sur chaque arête en prise se déplace en suivant l'hélice sur la largeur de coupe (fig. 47). De même pour les efforts d'avancement et de pénétration.

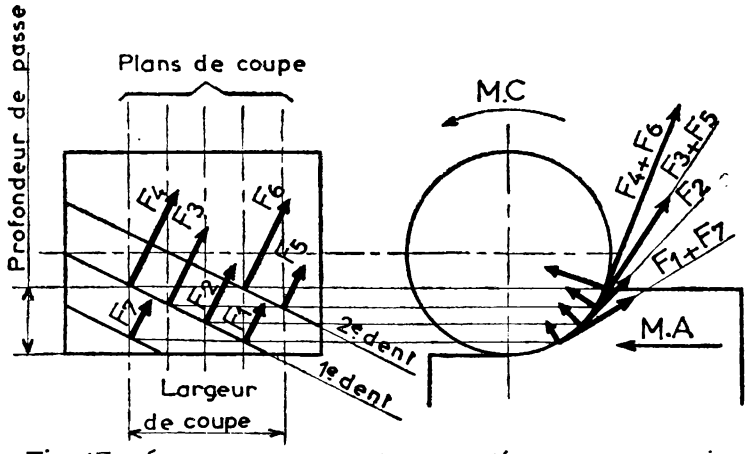


Fig. 47. Déplacement des efforts sur l'arbre porte-fraise.

Il s'ensuit que les actions radiales sur l'arbre porte-fraise se manifestent dans une région invariable et provoquent sa flexion ainsi que des défauts microgéométriques sur la surface. Il faut donc que l'arbre porte-fraise soit de forte section pour résister à la fois aux efforts de torsion et aux efforts de flexion.

2° Lorsque la fraise doit usiner une rainure étroite (fig. 48), elle est à trois tailles. Sa taille hélicoïdale sur la périphérie est alternée dans le but d'éviter l'action trop continue des efforts axiaux (fig. 49).

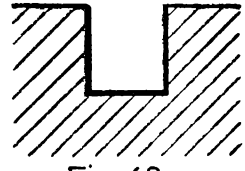


Fig. 48: Rainure étroite

Fig. 49 - Fraise à trois tailles alternées.

II. — MODES D'ACTION D'UNE FRAISE

A. FRAISAGE EN OPPOSITION

C'est le fraisage tel qu'il est défini sur les figures 43 et 46. Le mouvement de coupe est de sens contraire à celui de l'avance de la pièce. L'épaisseur du copeau nulle au début de l'attaque — point **a** — est maximum au sortir de la dent.

Lorsque l'arête est au point **a**, elle glisse sur la pièce puisqu'en ce point l'épaisseur du copeau est nulle, et elle ne coupera que lorsque l'épaisseur sera égale à celle du copeau minimum.

Ce glissement occasionne un écrouissage du métal. La dent qui trouve, après plusieurs

autres, son copeau minimum, attaque donc une surface très écrouie, très dure, ce qui entraîne une usure prématurée de la fraise. Ceci explique le rendement peu élevé de la fraise travaillant en opposition par rapport à celui d'un outil à charioter.

Action et réaction de l'outil et de la pièce.

a. La fraise est à taille droite (fig. 50).

Les efforts à vaincre sont :

— l'effort de coupe $\mathbf{F}_c$ normal au rayon aboutissant à l'arête coupante ;

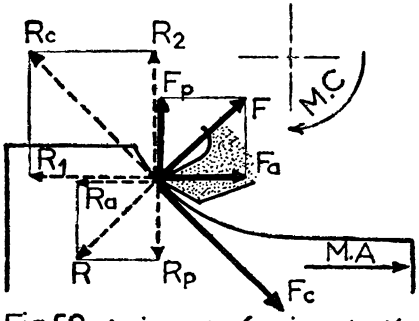


Fig.50 : Action et réaction de l'outil et de la pièce dans le fraisage en opposition.

— l'effort radial $\mathbf{F}$ perpendiculaire à $\mathbf{F}_c$ et à l'arête coupante. Cet effort se décompose en $\mathbf{F}_a$ qui est l'effort d'avancement et en $\mathbf{F}_p$ qui est l'effort de pénétration.

L'outil réagit suivant $\mathbf{R}$ et $\mathbf{R}_c$ qui se décomposent en $\mathbf{R}_2$ et $\mathbf{R}_p$ dont la résultante tend à soulever la pièce, donc la table, et en $\mathbf{R}_1$ et $\mathbf{R}_a$ qui s'ajoutent et occasionnent une forte pression sur l'arête coupante et, par suite, son usure assez rapide.

b. La fraise est à taille hélicoïdale (fig. 44 et 45).

L'effort $\mathbf{F}'_c$ donne lieu à la composante tangentielle $\mathbf{T} = \mathbf{F}'_c = \cos \alpha$ et on retrouve ensuite l'action radiale $\mathbf{F}$ et ses composantes $\mathbf{F}_a$ et $\mathbf{F}_p$ comme pour la fraise de la figure 50.

B. FRAISAGE EN CONCORDANCE OU EN AVALANT (fig. 51).

Le mouvement de coupe et le mouvement d'avance sont de même sens.

Lorsque la dent attaque, le copeau a son épaisseur maximum de sorte que l'arête coupante ne glisse pas sur le métal. Lorsque la dent quitte le métal — point **a** — le copeau finit d'être enlevé presque sans pression bien qu'il ait une épaisseur inférieure au minimum. La surface obtenue est d'un bel aspect mat.

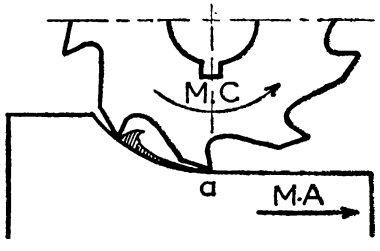


Fig.51 : Mode d'action d'une fraise travaillant en concordance.

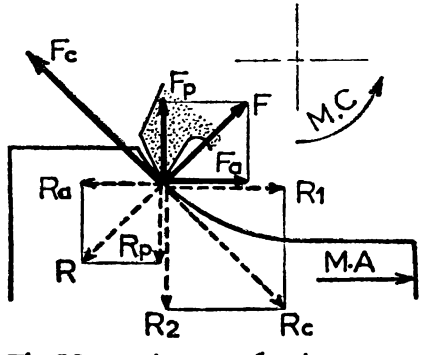


Fig.52 : Action et réaction de l'outil et de la pièce dans le fraisage en concordance

Action et réaction de l'outil et de la pièce.

a. La fraise est à taille droite (fig. 52).

Les efforts qui s'appliquent à la fraise sont :

— l'effort de coupe $\mathbf{F}_e$ normal au rayon aboutissant à l'arête coupante;

— l'effort d'avancement $\mathbf{F}_a$ et l'effort de pénétration $\mathbf{F}_p$. Ces deux efforts agissent comme pour le fraisage en opposition, tandis que l'effort $\mathbf{F}_c$ est de sens contraire.

Les réactions de l'outil sur la pièce sont :

— $\mathbf{R}_2$ et $\mathbf{R}_p$ qui s'ajoutent et plaquent la pièce sur la table et, par conséquent, la table sur le chariot transversal;

— $\mathbf{R}_1$ et $\mathbf{R}_a$ dont la résultante agit dans le même sens que l'avance. La fraiseuse doit donc être munie d'un dispositif de freinage d'avance pour annuler les à-coups.

b. La fraise est à taille hélicoïdale.

L'effort tangentiel **T** et la poussée **P** se calculent comme il l'a été dit dans le cas du fraisage en opposition.

Système de freinage de la table (fig. 53).

Deux vis de même pas, l'une à droite et l'autre à gauche, sont reliées par deux pignons d'un même nombre de dents. Les vis tournent donc en sens contraires. On règle le positionnement angulaire des pignons de telle sorte qu'une vis s'appuie sur l'écrou par ses flancs gauches et l'autre par ses flancs droits.

Ainsi sont supprimés les à-coups provenant des jeux alors qu'une dent de la fraise attaque la partie la supérieure de la pièce.

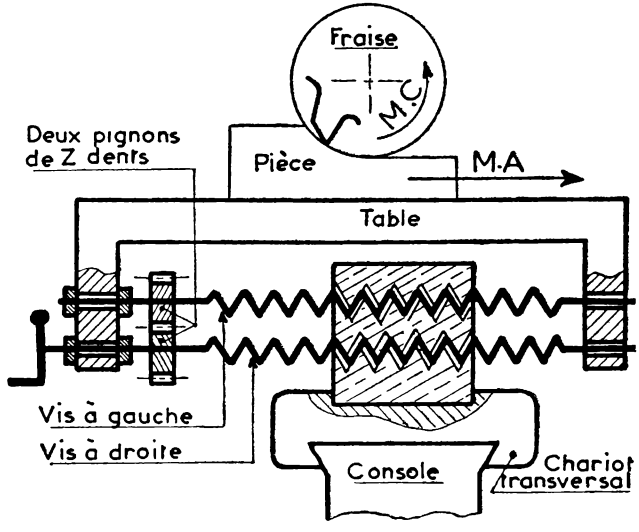


Fig. 53 - Système de commande et de freinage de la table d'une fraiseuse travaillant en concordance

III. — ÉTAT D'UNE SURFACE FRAISÉE DE PROFIL

L'état d'une surface fraisée de profil dépend de l'avance par dent et du diamètre de la fraise (fig. 54).

Plus l'avance est petite, moins profonds sont les sillons. Comme l'avance par dent est toujours faible (0,05 à 0,15 *mm*), c'est le diamètre de la fraise qui intervient le plus dans l'état de surface. Plus le diamètre est grand, moins profonds sont les sillons.

Cependant, la fraise présente toujours une dent plus basse que toutes les autres du fait de son excentricité sur son arbre et quelquefois du faux-rond de cet arbre. Il s'ensuit que cette dent basse est la dent finisseuse de la surface, qu'elle travaille avec une avance égale à l'avance

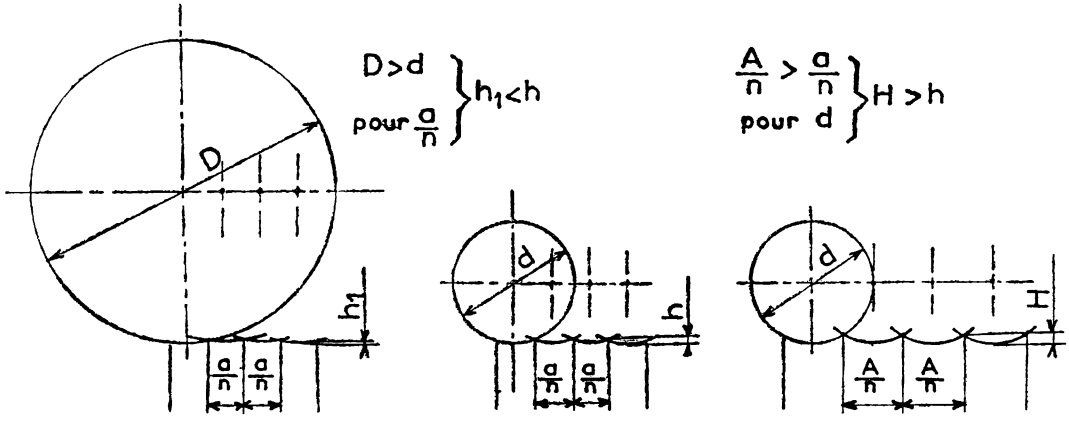


Fig.54: L'état d'une surface fraisée de profil dépend, théoriquement, du diamètre de la fraise et de la grandeur de l'avance par dent.

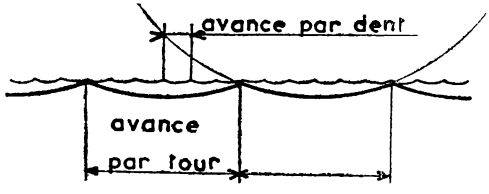


Fig.55: Le sillon laissé par la "dent basse" correspond à l'avance par tour.

par tour (fig. 55) ce qui supprime les sillons rapprochés et les remplace par d'autres plus profonds et plus larges.

Enfin, il faut encore tenir compte des flexions de l'arbre porte-fraise et des vibrations de l'ensemble qui sont des causes d'amplification des défauts. La profondeur réelle des sillons (fig. 55) est de l'ordre de 0,02 à 0,03 *mm*.

FRAISAGE DE FACE

I. — FRAISES DE FACE

On les appelle aussi fraises à surfacer. Leur denture peut être :

a. taillée dans des ébauches obtenues par estampage lorsque la fraise est d'un diamètre déjà important ou encore taillée dans un cylindre (fig. 56). Cette dernière fraise présente la particularité d'être à la fois fraise de profil et fraise de face car **elle peut travailler en bout.**

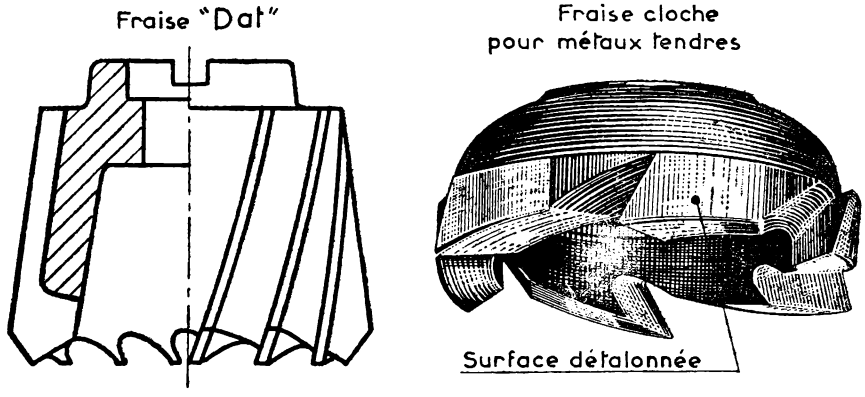


Fig:56- Fraises de face à denture taillée

b. constituée par des outils simples (barreaux en A.R.S. ou encore pastillés en carbures métalliques) rapportés sur un corps de révolution appelé tourteau (fig. 57). Ce dernier modèle est très économique et très productif : les outils usés se remplacent facilement, les copeaux s'écoulent aisément et le liquide de refroidissement circule librement entre les dents. Parfois les barreaux sont remplacés par des lames plates (fig. 58). Ces outils, lorsqu'ils sont de grand diamètre, se montent directement sur le nez de la broche.

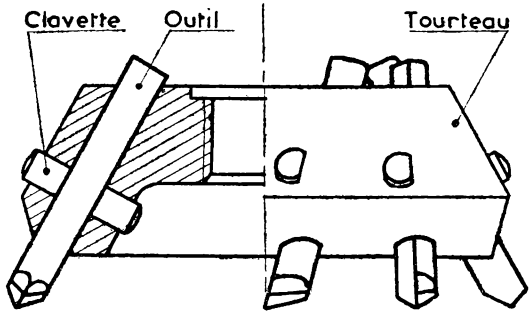


Fig:57 - Fraise Antoine

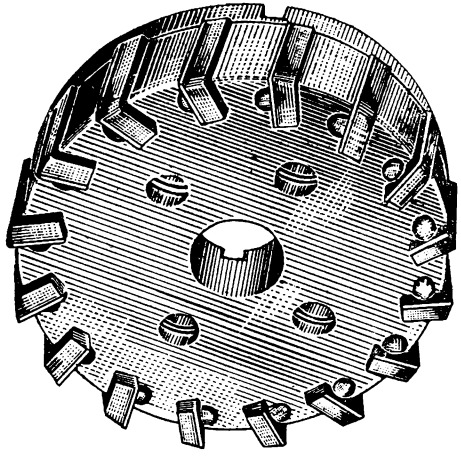


Fig:58- Fraise de face à lames plates rapportées.

II. — ACTIONS RÉCIPROQUES DE LA PIÈCE ET DE L'OUTIL

Les réactions de l'outil, qui s'opposent aux actions de la pièce sur une dent sont (fig. 59-1), la réaction de coupe $\mathbf{R}_c$ et la réaction radiale $\mathbf{R}_a$ qui admettent $\mathbf{R}_1$ comme résultante.

Reportons sur chaque dent en prise (fig. 59-2) les efforts $\mathbf{R}'_1$ et $\mathbf{R}''_1$ égaux à $\mathbf{R}_1$; ces efforts admettent **R** comme résultante. Cette réaction composante agit sur la table de la machine et se reporte sur les appuis des chariots (vis et glissières), longitudinalement suivant $\mathbf{R}_A$ et transversalement suivant $\mathbf{R}_T$. Dans le cas de la figure on voit que $\mathbf{R}_A$ est de sens contraire au déplacement d'avance de la pièce $\mathbf{M_1A}$. On dit alors que **la fraise travaille en opposition.**

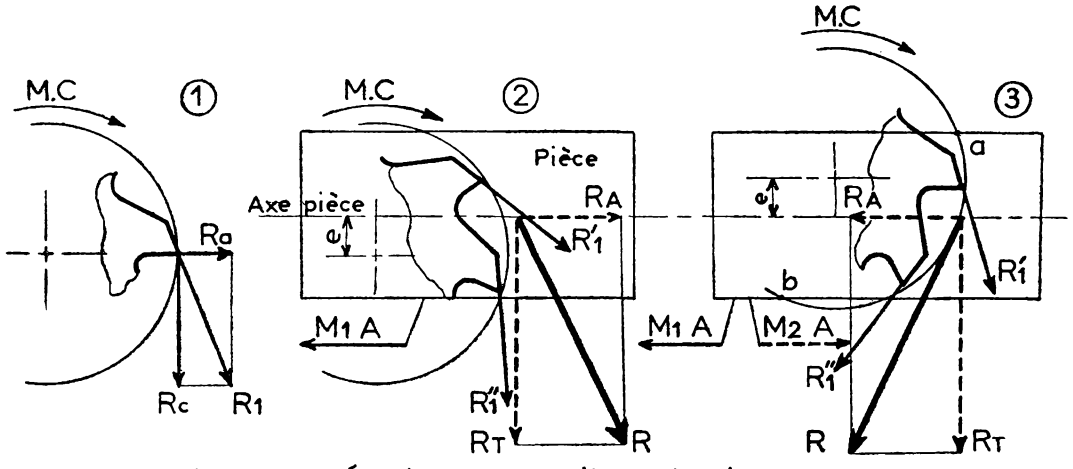


Fig:59– Réactions de l'outil sur la pièce

① R1 est la résultante des réactions de coupe Rc et radiale Ra
② RA et M1A sont de sens contraires : fraisage en opposition
③ RA et M1A sont de même sens : fraisage en concordance

Dans le cas de la figure 59-3, en conservant le sens de rotation de coupe **MC** et le sens d'avance $\mathbf{M_1A}$ et en déterminant les composantes $\mathbf{R}_A$ et $\mathbf{R}_T$ de la résultante **R**, on constate que $\mathbf{R}_A$ est de même sens que l'avance $\mathbf{M_1A}$ de la pièce. **La fraise travaille en avalant,** ce qui provoque des chocs à chaque entrée en contact des dents avec la pièce par suite du jeu qui existe entre les filets de l'écrou et ceux de la vis de commande de la table.

Il résulte de cette remarque que la fraise doit occuper la position 2, c'est-à-dire que **l'axe de la pièce doit se trouver entre l'axe de la fraise et le point d'attaque de chaque dent.** Pour que cette condition soit réalisée sur la figure 59-3, il faudrait inverser le sens d'avance de la pièce suivant $\mathbf{M_2A}$. Le point d'attaque de chaque dent se situerait alors en **b** au lieu de **a.**

III. — ÉTAT D'UNE SURFACE FRAISÉE DE FACE

La figure 60 montre que l'état d'une surface fraisée de face dépend des facteurs suivants :

— grandeur de l'avance par dent;

— grandeur de l'angle de dépouille latérale α ou dépouille interne.

Plus l'avance et l'angle de dépouille sont petits, meilleur est l'état de surface. Cependant,

dans le fraisage de face, le voile plus ou moins grand de la fraise détermine une dent basse. Cette dent laisse des sillons dont l'avance correspond à l'avance par tour (fig. 61).

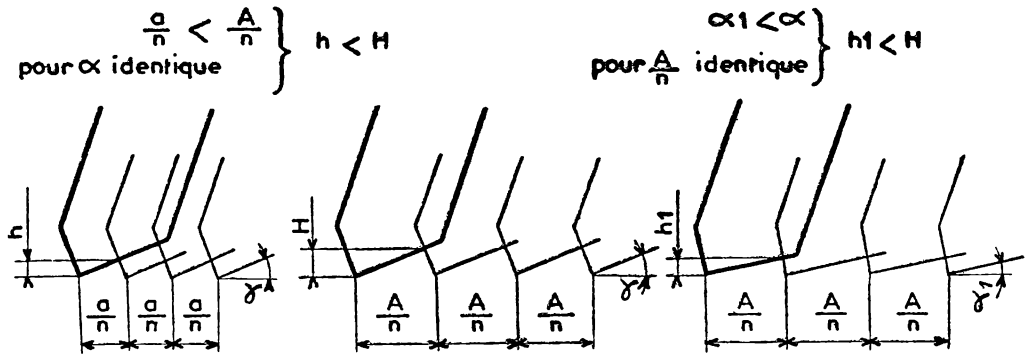


Fig:60 – L'état d'une surface fraisée de face dépend théoriquement de la grandeur de l'avance par dent et de la valeur de la dépouille latérale α

En définitive, c'est l'angle de dépouille latérale qui influe le plus sur l'état de surface. En pratique un angle de 30′ est suffisant pour la finition de pièces devant rester brutes de fraisage.

De plus, lorsque l'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface, les dents laissent leur trace suivant un trait croisé (fig. 62). Il faut donc que la fraise se dégage complètement de la pièce, ce qui conduit à une course de travail $\mathbf{C = L + d}$. Le frottement des dents sur la surface suivant l'arc laissé par la partie arrière de la fraise provoque son usure prématurée.

Si l'on incline la fraise d'un angle $\alpha = 2'$ (fig. 62) et si l'on utilise une fraise assez grosse ($\mathbf{D} \geqslant 200$ *mm*) la concavité de la surface atteint une profondeur de

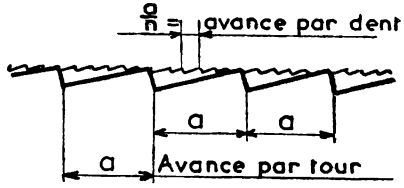


Fig:61– Le sillon laissé par la dent basse correspond à l'avance par tour.

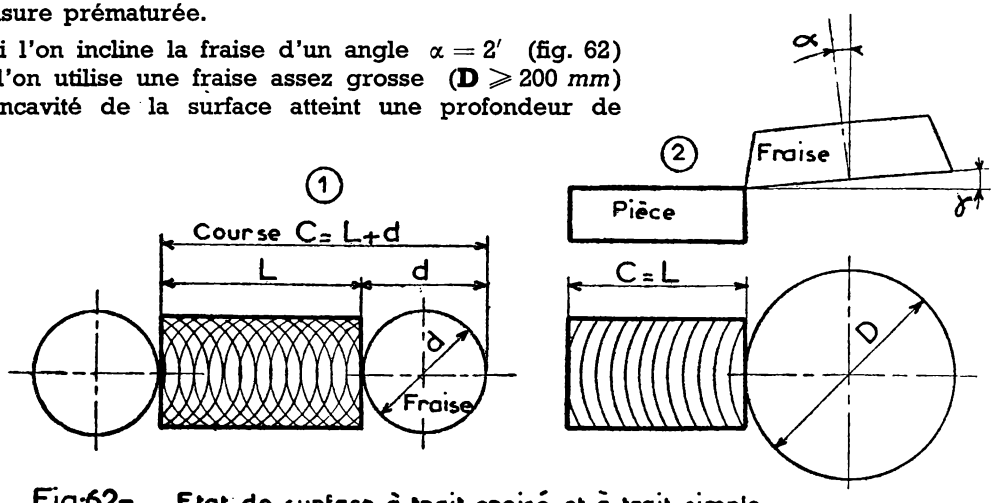


Fig:62– Etat de surface à trait croisé et à trait simple

0,02 *mm* environ pour une largeur de coupe de 150 *mm*. Cette incorrection est très acceptable si on considère que la course se réduit à $\mathbf{C \simeq L}$, qu'il y a donc gain de temps et que la surface n'est marquée que d'un trait simple.

CONDITIONS DE COUPE DES FRAISES

I. — VITESSE DE COUPE

Pour l'obtention du plan, que la fraise soit de profil ou de face, la vitesse d'utilisation **est toujours la vitesse économique $\mathbf{V}_e$ car l'affûtage est facile.** Nous rappelons que la vitesse économique est les $\frac{4}{3}$ de la **vitesse de moindre usure $\mathbf{V}_o$** :

$$\mathbf{V}_e = \frac{4}{3}\mathbf{V}_o$$

D'autre part, la vitesse de moindre usure dans le fraisage sous lubrification abondante est les $\frac{5}{4}$ de la vitesse de moindre usure sous faible arrosage :

$$\mathbf{V}_{o2} = \mathbf{V}_{o1} \times 1{,}25$$

Enfin si le fraisage se fait à sec, prendre $\mathbf{V}_{os} = \frac{2}{5}\mathbf{V}_{o1}$.

La vitesse de coupe de moindre usure $\mathbf{V}_{o1}$ a été établie par le Cdt Denis pour les conditions de coupe ci-après :

$\frac{\mathbf{a}}{\mathbf{n}}$ = avance par tour et par dent = 0,05 *mm*;

S = somme de la largeur de coupe **l** et de la profondeur de passe **P** = 50 *mm* (fig. 63); travail sous faible arrosage.

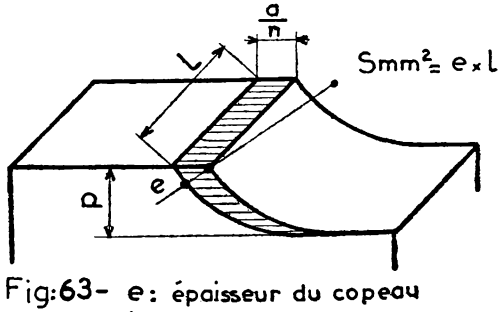


Fig:63- e: épaisseur du copeau
L: largeur de coupe
P: profondeur de passe

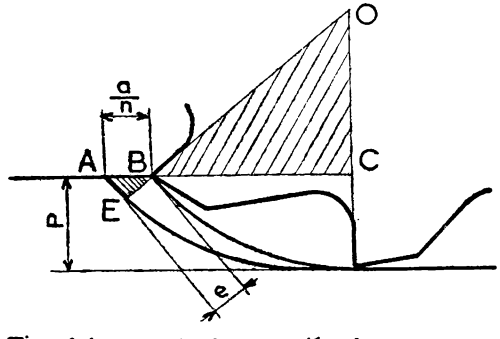


Fig:64- Variation de l'épaisseur du copeau

II. — SECTION DU COPEAU

Pour le calcul de la puissance de coupe, la section à considérer est $S\,mm^2 = e \times l$ (fig. 63).

A. CALCUL DE e EN FONCTION DE $\frac{a}{n}$ ET DE p

Dans la figure 64, le triangle curviligne **ABE** peut être assimilé à un triangle rectangle en **E** et semblable au triangle rectangle **OCB** et l'on peut poser :

$\frac{e}{BC} = \frac{\frac{a}{n}}{OB}$ d'où $e = \frac{a}{n} \times \left(\frac{BC}{r}\right)$. Cette relation indique que :

— pour une même fraise, l'épaisseur du copeau est fonction directe de l'avance par dent;

— si l'on engage la fraise sur une profondeur à son rayon, le rapport $\frac{BC}{r}$ devient $\frac{r}{r} = 1$;

on a alors $e = \frac{a}{n}$;

— si **p** est très petit (passe de finition, **BC** devient négligeable et $\frac{BC}{r} \simeq \frac{0}{r} = 0$ de sorte que $e \simeq 0$ et devient plus petit que le copeau minimum.

Or, des essais ont montré que la pression spécifique de coupe **K** (1) augmente lorsque **e** diminue. Aux environs du copeau minimum elle peut devenir 10 fois égale à la charge de rupture du métal usiné.

Ceci explique que :

1° La fraise qui travaille en concordance, ou en avalant, conserve sa coupe plus longtemps qu'une fraise qui travaille en opposition, car le copeau est toujours supérieur au copeau minimum (voir fig. 51).

2° Au cours d'une passe de finition, puisque **p** est très petit, il faut augmenter $\frac{a}{n}$ pour que **e** soit supérieur ou égal au copeau minimum.

B. CALCUL DE L'AVANCE PAR TOUR a ET PAR DENT $\frac{a}{n}$.

En observant que $OC = r - p$, pour le triangle rectangle **OBC**, on peut écrire $BC = \sqrt{r^2 - (r-p)^2} = \sqrt{p(2r-p)}$. Donc finalement, en reportant cette valeur dans la relation $e = \frac{a}{n} \times \frac{BC}{r}$ on a $e = \frac{a}{n} \times \frac{\sqrt{p(2r-p)}}{r}$.

De cette relation on tire $\frac{a}{n} = e \times \frac{r}{\sqrt{p(2r-p)}}$.

---

(1) La pression spécifique de coupe est la valeur de l'effort de coupe pour 1 mm^2 de section de copeau.

Application : Quelle avance doit-on donner à une fraise de 80 *mm* engagée sur une profondeur de passe de 0,2 *mm* qui doit prendre un copeau de 0,1 *mm* d'épaisseur.

On a $\mathbf{e} = 0{,}1$; $\mathbf{r} = \frac{80}{2} = 40$ et $\mathbf{p} = 0{,}2$ d'où $\frac{\mathbf{a}}{\mathbf{n}} = 0{,}1 \times \frac{40}{\sqrt{0{,}2 \times (2 \times 40 - 0{,}2)}} = 1$ *mm*.

C. CALCUL DE L'EFFORT DE COUPE

L'effort de coupe $\mathbf{F}_c$ (fig. 50 pour la denture droite) ou $\mathbf{T}$ (fig. 44 pour la denture hélicoïdale) est donné par la relation générale $\mathbf{F}_c = \mathbf{S} \times (\mathbf{R}_r)_e \times \mathbf{K}$.

Application : Une fraise à denture droite de 100 *mm* de diamètre travaille de l'acier doux à 45 kg/mm^2 dans les conditions suivantes : avance par dent = 0,4 *mm* ; profondeur de passe = 5 *mm* ; largeur de coupe = 60 *mm*. On prendra $\mathbf{K} = 3$.

On a $\mathbf{S} = \mathbf{e} \times \mathbf{l}$, $(\mathbf{R}_r)_e = 45$ kg/mm^2, $\mathbf{l} = 60$ *mm*.

Epaisseur du copeau $\mathbf{e} = \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{n}} \times \frac{\sqrt{\mathbf{p}(2\mathbf{r} - \mathbf{p})}}{\mathbf{r}} = 0{,}4 \times \frac{\sqrt{5(100 - 5)}}{50} = 0{,}17$ *mm*.

Effort de coupe $\mathbf{F}_c = (0{,}17 \times 60) \times 45 \times 3 = 1\,377$ *kgf* ou $9{,}81 \times 1\,377 = 13\,500$ *N* (newton)

D. CALCUL DE LA PUISSANCE DE COUPE

On l'exprime en kilogrammètres par seconde ou en chevaux-vapeur (1 CH = 75 *kgm/s*) ou encore en watts (1 W = 1 joule/seconde).

Soit ici :

$$\mathbf{P}_{CH} = \frac{\mathbf{F}_c\, kg.f \times \text{Chemin parcouru en 1 minute}}{60 \times 75} = \frac{\mathbf{F}_c \times \pi \mathbf{DN}}{60 \times 75}$$

$$\mathbf{P}_{W} = \frac{\mathbf{F}_c N \times \text{Chemin parcouru en 1 minute}}{60} = \frac{\mathbf{F}_c \times \pi \mathbf{DN}}{60}$$

mais $\pi \mathbf{DN} = V m/mn$ qui est la vitesse de coupe.

Finalement $\mathbf{P}_{CH} = \frac{\mathbf{F}_c\, kg.f \times \mathbf{V}}{60 \times 75}$ et $\mathbf{P}_{W} = \frac{\mathbf{F}_c N \times \mathbf{V}}{60}$

Application : Pour la fraise précédente, en admettant une vitesse de coupe $\mathbf{V} = 30$ m/mn on aurait :

$$\mathbf{P}_{CH} = \frac{1\,377 \times 30}{60 \times 75} \simeq 9_{CH} \quad \text{et} \quad \mathbf{P}_{W} = \frac{13\,500 \times 30}{60} = 6\,750\, w = 6{,}75\ Kw.$$

Remarques. — 1° Dans les mêmes conditions, une fraise à taille hélicoïdale inclinée de 20° sur l'axe aurait nécessité un effort tangentiel $\mathbf{T} = \mathbf{F}_c \times \cos 20° = 1377 \times 0{,}939 = 1\,293$ *kg/f* ou encore $\mathbf{T} = 13\,500 \times 0{,}939 = 12\,676$ *N* et une puissance de coupe :

$\mathbf{P'}_{CH} = P \times \cos 20° = 9 \times 0{,}939 = 8{,}5_{CH}$ ou encore $\mathbf{P'}_{KW} = 6{,}75 \times 0{,}939 = 6{,}33$ *kw*.

2° La puissance de coupe ainsi calculée est la puissance nécessaire à la broche de la machine ou **puissance utile** $\mathbf{P}_u$, en supposant toutefois qu'il n'y ait qu'une dent de la fraise en travail, mais coupant un copeau d'épaisseur **e.**

La puissance du moteur $\mathbf{P}_m$ est plus élevée, car il doit vaincre les résistances passives de la chaîne cinématique. Le rendement de la machine qui est le quotient des deux, soit $\rho = \frac{\mathbf{P}_u}{\mathbf{P}_m}$ est généralement connu. Dans le cas précédent, en admettant $\rho = 0{,}8$, la puissance du moteur sera :

— pour la fraise à taille droite : $\mathbf{P}_m = \frac{9}{0{,}8} = 11_{ch}$ ou $\frac{6{,}75}{0{,}8} = 8{,}45_{kw}$;

— pour la fraise à taille hélicoïdale : $\mathbf{P}_m = \frac{8{,}5}{0{,}8} = 10{,}6_{ch}$ ou $\frac{6{,}33}{0{,}8} = 7{,}9_{kw}$.

LES MACHINES A FRAISER

Alors que les machines à raboter sont de même type, qu'elles soient destinées à la production ou à l'outillage, les machines à fraiser sont de types différents selon l'emploi auquel elles sont destinées.

I.— MACHINES DE PRODUCTION

Parmi ces machines, on distingue :

A. LES FRAISEUSES VERTICALES.

La figure 65 est le schéma d'une telle machine. La broche occupe toujours une position verticale.

Pour les machines de petite ou moyenne puissance, la table est solidaire d'une console **monte et baisse.** Pour les machines devant usiner des pièces lourdes, les chariots sont montés sur une console fixe faisant partie du bâti et la tête porte-broche est coulissante verticalement pour le réglage de la profondeur de passe.

Les fraiseuses verticales ne sont utilisées qu'en fraisage de face.

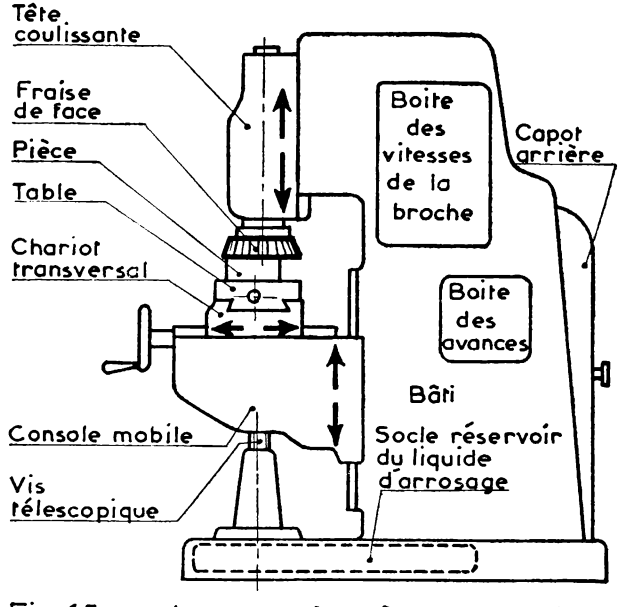


Fig:65- Fraiseuse verticale à console mobile et à tête coulissante. Le moteur est incorporé

B. LES FRAISEUSES HORIZONTALES.

La broche est toujours située horizontalement. Les chariots, table et transversal, sont montés sur une console **monte et baisse.** Des bretelles amovibles peuvent relier la lunette support de broche à la console ; ainsi est fermé le circuit des forces de coupe, ce qui assure une meilleure rigidité de l'ensemble.

C. LES FRAISEUSES RABOTEUSES (fig. 66).

Elles tirent leur nom de leur ligne générale qui rappelle celle des raboteuses. Elles sont destinées au fraisage de face des pièces lourdes et encombrantes.

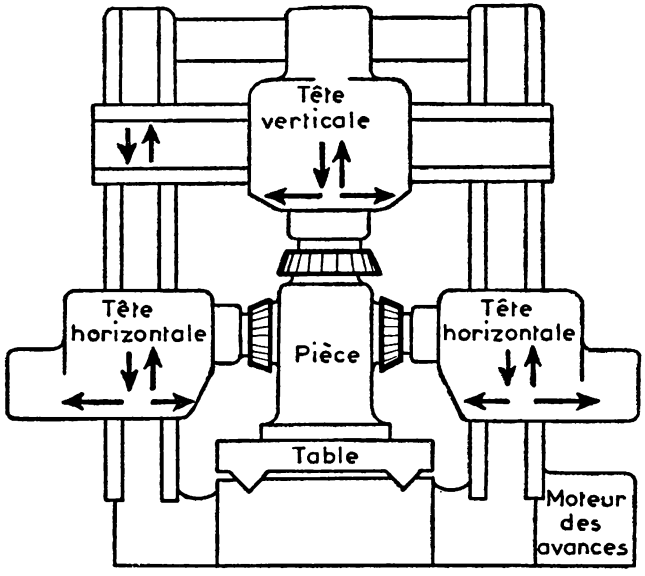


Fig:66- Fraiseuse raboteuse à trois têtes à commande individuelle . La boîte des avances a son moteur particulier

Ce sont toujours des machines à têtes multiples dont chacune a sa commande individuelle du mouvement de coupe. La table est commandée par vis et écrou (et non par crémaillère et pignon comme sur la raboteuse) pour assurer l'irréversibilité et éviter les à-coups. Parfois, la traverse porte deux têtes verticales.

Remarque. — Sur ce type de fraiseuse, comme on le fait sur les raboteuses, on peut exécuter des surfaçages sur des pièces relativement petites, montées en ligne ou en parallèle (voir méthodes de fraisage).

II. — MACHINES D'OUTILLAGE

La particularité de ces machines est d'avoir une **tête universelle,** c'est-à-dire orientable en tous sens. Ainsi on peut donner à la broche une position horizontale, verticale ou oblique. Ces machines sont à console mobile.

L'universalité de ces fraiseuses leur confère le grand avantage d'éviter des montages successifs de la pièce lorsqu'elle nécessite plusieurs opérations d'usinage (surfaces associées).

Les machines types sont les fraiseuses Huré et Gambin. La figure 67 est une tête universelle Huré à harnais, dont la broche est en position verticale. Il est facile d'imaginer les différentes positions que peut prendre la broche par pivotement sur le plateau vertical **B** seulement, ou sur le plateau incliné **A** seulement, ou sur les deux.

Les différentes valeurs des pivotements sont données par des tableaux en fonction de l'orientation de la broche dans l'espace.

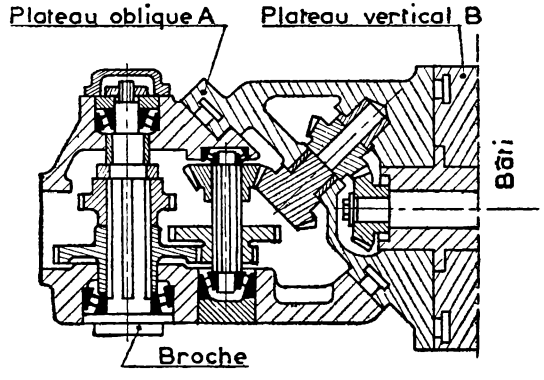


Fig:67- Tête universelle HURÉ à harnais

TRAVAUX DE FRAISAGE

Nous n'envisagerons ici, comme nous l'avons fait pour le rabotage, que l'énoncé de quelques règles ou conseils qui peuvent d'ailleurs s'étendre bien au-delà des exemples choisis et qui permettront de tirer le meilleur parti de l'outil et de la machine.

I. — RÉGLAGE DE LA POSITION DE LA BROCHE

A. POSITIONS VERTICALE ET HORIZONTALE.

Ces positions, qui sont nécessairement à déterminer sur les fraiseuses universelles, sont repérées par de petites broches coniques de positionnement (fig. 68) qui, après blocage de la tête, doivent être enlevées avant le fraisage.

B. POSITIONS INCLINÉES.

Pour les angles courants, 30, 45 et 60°, les mêmes broches assurent une position correcte.

Pour les autres inclinaisons, une première approximation est donnée par la graduation de la tête. Le parachèvement du réglage est obtenu ensuite à l'aide d'une broche de réglage rectifiée, d'un calibre d'angle ou d'une équerre barre-sinus et d'une pige de petit diamètre, 3 *mm* environ (fig. 69).

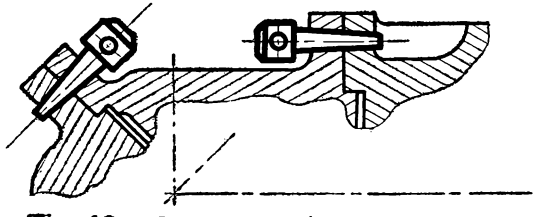


Fig. 68 – Broches coniques pour le positionnement d'une tête HURÉ

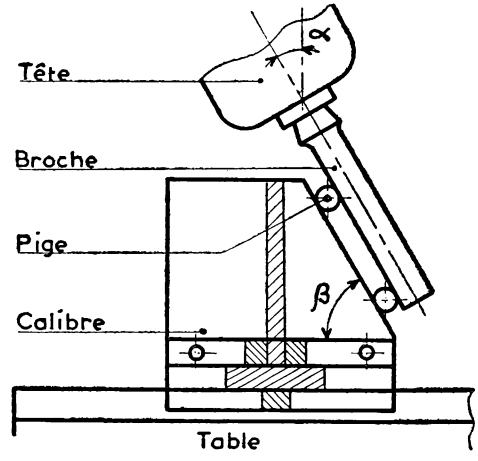


Fig. 69 – Réglage de l'inclinaison d'une broche à l'aide de pige et de calibre. $\alpha + \beta = 90°$

II. — CHOIX DE LA FRAISE

a) En fonction de l'état de surface.

La vérification de l'état des surfaces 1 et 2 (fig. 70) montre que la surface 1, fraisée de face, est plus précise que la surface 2, fraisée de profil. Donc, le fraisage de face sera nécessaire chaque fois que l'état de la surface fraisée demande un fini poussé.

b) En fonction de la précision de l'usinage et du prix de revient.

Pour un même travail, adopter en principe le plus petit diamètre de fraise acceptable, en raison :

— du plus faible prix d'achat de la fraise et des longueurs d'approche et de sortie, d'où diminution du temps de travail;

— de la diminution de la contrainte de torsion de l'arbre porte-fraise (broutement moins important).

Entre deux fraises de même diamètre, choisir celle qui comporte le plus grand alésage (contrainte de flexion de l'arbre porte-fraise moins élevée).

Utiliser une fraise de face plutôt qu'une fraise de profil (meilleur montage, meilleures conditions de coupe, affûtage plus facile).

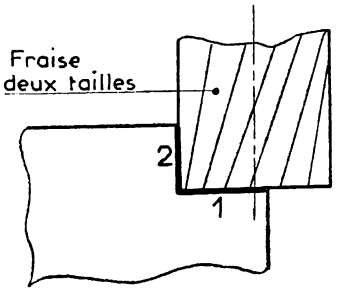


Fig:70– La face 1, fraisée de face, est plus précise que la face 2 fraisée de profil.

III. — TRAINS DE FRAISES

Pour exécuter la pièce figure 71, qui présente des surfaces associées, on peut régler successivement la fraise selon les positions 1, 2, 3, 4 et c'est la solution à adopter dans le cas d'une fabrication peu importante.

Mais il est préférable, dans le cas de fabrication en série, d'usiner les pièces par **train de fraises** (fig. 72) pour éviter ces réglages et ces passes successifs et réaliser ainsi un gain de temps considérable.

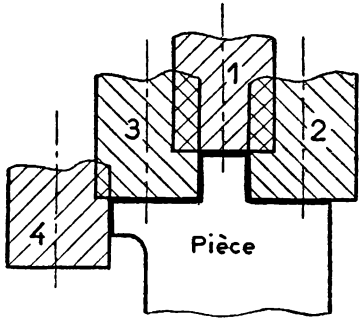


Fig:71– Surfaces associées réalisées séparément.

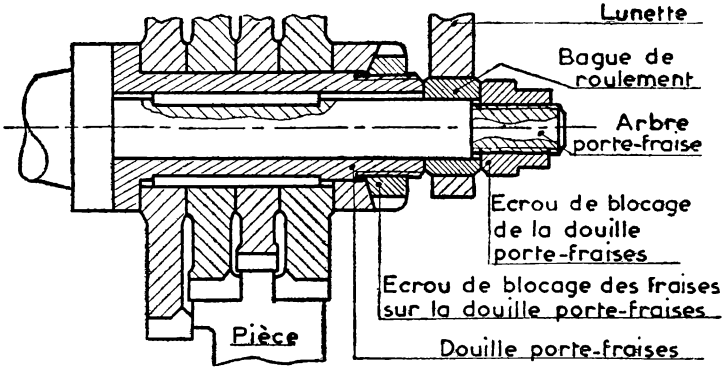


Fig:72– Train de fraises montées sur un arbre creux spécialement construit pour ce train.

Les fraises peuvent être montées directement sur l'arbre porte-fraises. Mais la fabrication d'arbres creux spéciaux, comme l'indique la figure, permet, dès qu'un train de fraises doit partir à l'affûtage, de le remplacer par un autre dont l'écartement des fraises a été réglé préalablement par l'interposition de bagues intercalaires de fabrication soignée.

L'adoption d'un train de fraises est soumise aux règles suivantes :

1° La différence entre le diamètre de la plus grande fraise et celui de la plus petite doit être assez faible afin d'éviter des vitesses de coupe trop différentes, car la vitesse angulaire est la même pour toutes les fraises.

2° Employer un arbre porte-fraise très résistant, de parfaite cylindricité et des bagues d'interposition soignées.

3° Disposer des lunettes aussi près que possible des fraises pour éviter des déformations de l'arbre et relier la lunette avant à la console par des bretelles pour augmenter la rigidité de l'ensemble.

IV. — TRAJECTOIRE ÉLASTIQUE RELATIVE DE L'OUTIL

Par sa forme, la fraise ne se prête pas, comme l'outil d'étau-limeur par exemple, à l'obtention d'une trajectoire élastique dégageante. Il est donc nécessaire de jouer sur les sens relatifs des mouvements de coupe et d'avance.

Ainsi la trajectoire élastique (fig. 73) sera :

— **dégageante** pour l'avance $\mathbf{A}_1$ de la pièce, car sous l'effet de la résultante $\mathbf{F}_1$ des efforts de coupe, la pièce tend à fléchir ;

— **engageante** pour l'avance $\mathbf{A}_2$, car sous l'effort $\mathbf{F}_2$ la surface fraisée a tendance à se soulever.

La trajectoire dégageante évite le broutement mécanique, parfois accompagné du phénomène de résonance, et donne un meilleur état de surface.

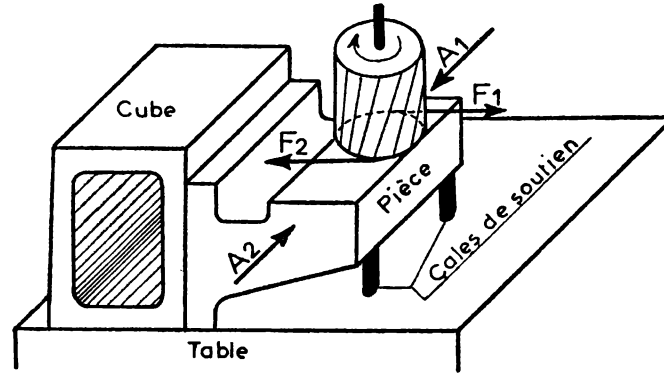


Fig:73– Suivant le sens de l'avance, l'outil a une trajectoire élastique relative :
-dégageante pour A1 → F1
-engageante pour A2 → F2

MÉTHODES DE FRAISAGE

Les méthodes données ci-après s'appliquent à la production en série.

I. — MÉTHODE DE LA PIÈCE UNIQUE

La pièce est fixée en étau, dans un montage d'usinage ou directement sur la table de la fraiseuse contre des butées de position.

La durée du façonnage comprend pour chaque pièce le temps de manipulation et le temps

de coupe. Le procédé est donc long et onéreux et il ne peut être avantageux que si le temps de coupe pendant lequel la machine travaille seule est trop court pour que l'opérateur l'utilise à des manipulations ou s'il s'applique à des petites séries ne justifiant pas une étude particulière.

II. — MÉTHODE DU FRAISAGE ALTERNATIF

La fraise se trouve entre les deux pièces montées aux extrémités de la table (fig. 74). Pendant le fraisage de la pièce 1, l'opérateur change la pièce fraisée 2 et lors du fraisage de la pièce 2 il change la pièce 1.

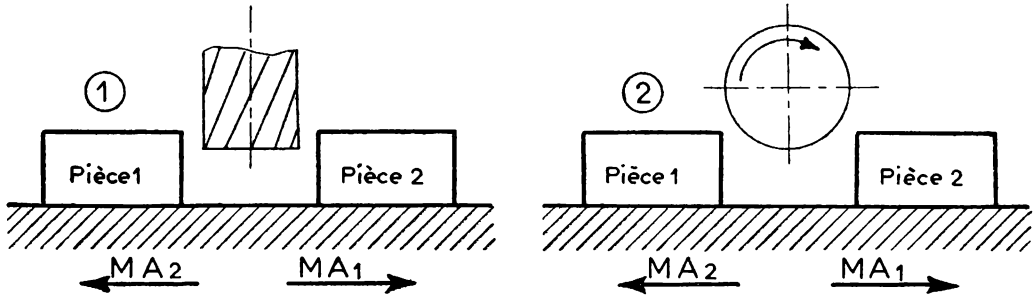


Fig:74— Fraisage alternatif
① Sur fraiseuse à coupe en opposition: ne permet que le fraisage de face
② Sur fraiseuse à coupe en concordance: permet le fraisage de face et de profil.

Le temps de manipulation d'une pièce est donc partiellement ou totalement couvert par le temps de coupe de la deuxième. Si la machine est munie du retour rapide, il y a de plus réduction des temps d'approche.

Si la fraiseuse utilisée n'est conçue que pour la coupe en opposition, on ne peut exécuter que le fraisage de face (fig. 74-1), car la fraise entre alternativement par sa droite et par sa gauche.

Pour adopter le fraisage de profil (fig. 74-2), il faut donc disposer d'une machine à coupe en concordance, car cette machine peut également travailler en coupe en opposition.

Pour éviter tout danger pour l'opérateur pendant le changement des pièces, il faut qu'elles soient assez éloignées l'une de l'autre.

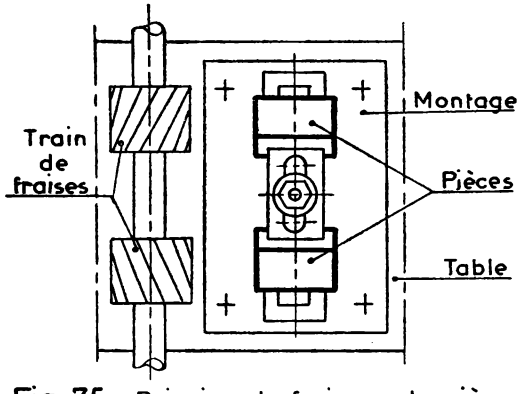


Fig:75— Principe du fraisage de pièces montées en parallèle

III. — MÉTHODE DES PIÈCES EN PARALLÈLE

On utilise dans ce cas un train de fraises et on monte les pièces en rang (fig. 75).

Le temps de coupe **t** pour **n** pièces fraisées simultanément est donc le même que pour une pièce et par suite le temps de coupe unitaire est **t/n**.

Si l'on dispose d'une machine à coupe en concordance, on monte un rang de pièces de chaque côté du train de fraises.

Il faut évidemment une fraiseuse de puissance suffisante, car la puissance de coupe est proportionnelle au nombre de pièces en rang.

IV. — MÉTHODE DE LA BASE PIVOTANTE

Sur la table de la machine est fixée une base tournante (fig. 76) dont les angles de pivotement sont répétés avec précision : 180°, 120°, 90°, ... et sur laquelle sont montées 2, 3, 4... pièces. Celles-ci sont amenées en position de fraisage par pivotement de la base commandée manuellement.

Cette méthode permet une grande production et présente de plus les avantages suivants :

— l'opérateur ne se déplace pas;

— le montage et le démontage des pièces ont lieu au point le plus éloigné de la fraise, ce qui élimine les risques d'accident.

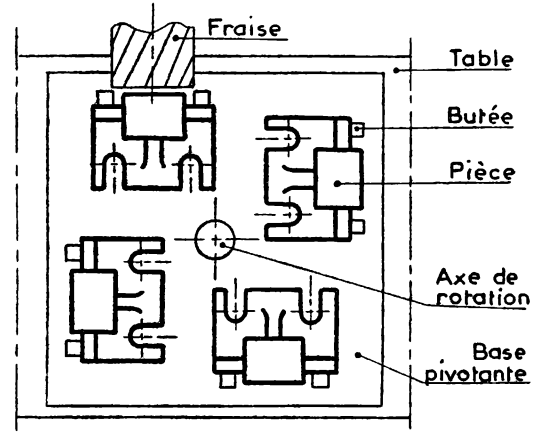


Fig:76– Principe du fraisage de pièces montées sur base tournante.

V. — MÉTHODE DU FRAISAGE CIRCULAIRE

Un plateau (fig. 77) animé d'un mouvement circulaire continu reçoit les pièces directement ou le plus souvent par l'intermédiaire des montages qu'il porte.

Les pièces sont disposées de telle façon qu'il y ait entre les parties à fraiser le moins d'espace

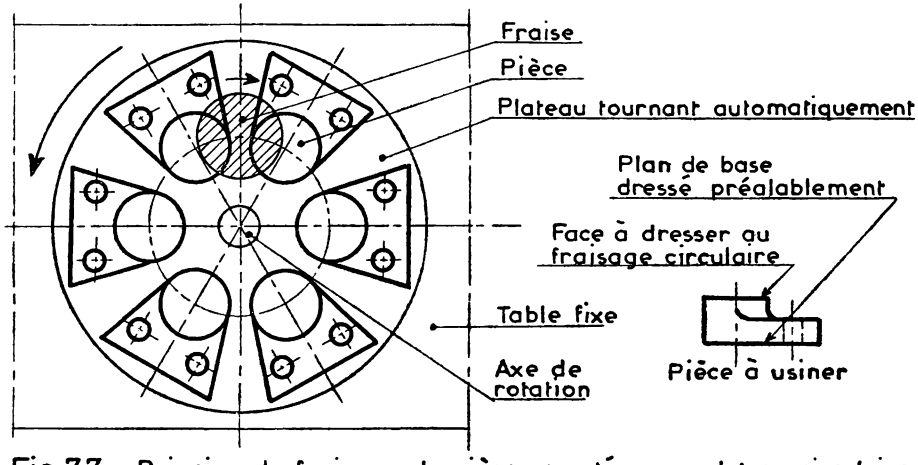


Fig:77– Principe du fraisage de pièces montées sur plateau circulaire

possible. Dans notre exemple, si les pièces étaient disposées avec l'aile de leur semelle vers le centre, il y aurait de grands vides entre les faces à fraiser et la production serait diminuée.

Cette méthode n'est applicable que si le montage et le démontage des pièces sont faciles et que si les frais de fabrication du plateau et des montages sont justifiés par un grand nombre de pièces à usiner.

Le plateau, disposé horizontalement ou verticalement, peut atteindre 2 *m* de diamètre. La vitesse linéaire du point façonné le plus éloigné de l'axe est la vitesse d'avance choisie pour le fraisage.

FRAISAGE PAR REPRODUCTION

Il est possible d'obtenir des formes fraisées par reproduction mécanique ou hydraulique. Le travail est alors plus rapide pour une plus grande précision des cotes demandées.

I. — REPRODUCTION MÉCANIQUE (fig. 78)

Un gabarit de forme est fixé sur la table et s'appuie constamment, par manœuvre du transversal, contre un doigt fixé au bâti.

Dans le tracé du gabarit, il faut tenir compte des diamètres de la fraise et du doigt. La distance **d** entre la fraise et le doigt est en effet constante. Pour obtenir la courbe **G** de la pièce, le centre

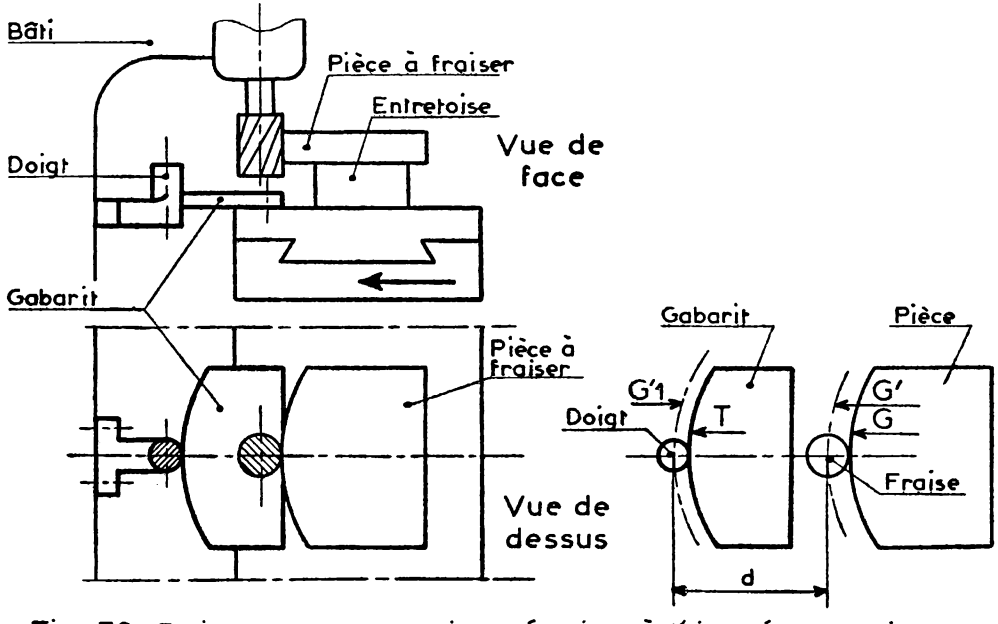


Fig: 78- Fraisage par reproduction mécanique à l'aide d'un gabarit.

de la fraise doit décrire la courbe **G'** obtenue par points. La génératrice G'_1 qui passe par le centre du doigt est donc identique à **G'** et la courbe **T** du gabarit est une courbe d'enveloppe correspondant aux différentes positions occupées par le doigt sur la courbe G'_1.

II. — REPRODUCTION HYDRAULIQUE

Le principe en est donné par la figure 79. Un chariot-traverse porte la broche support de fraise et une tête palpeur dont la touche s'appuie sur un gabarit de la forme à reproduire.

Au cours des différents mouvements verticaux que le palpeur reçoit par suite de l'avance du gabarit porté par la table, la sous pape d'écoulement de l'huile sous pression qu'il commande agit sur

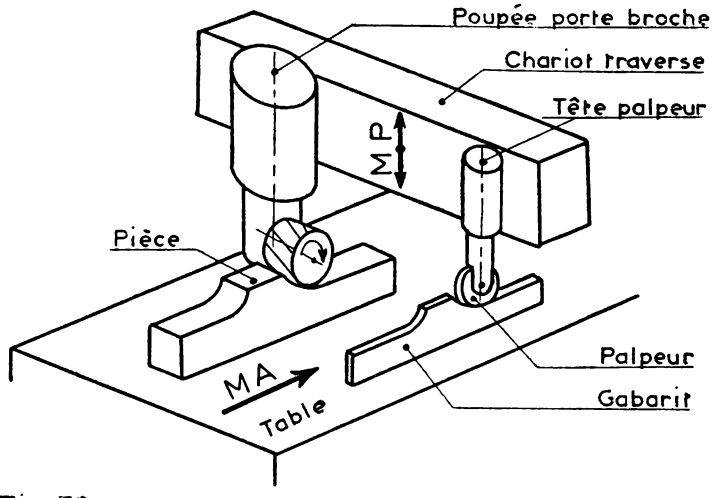


Fig:79- Principe du fraisage par reproduction hydraulique

le déplacement de monte et baisse du chariot-traverse. La fraise, qui suit le mouvement de la traverse, façonne donc une forme identique à celle du gabarit (1).

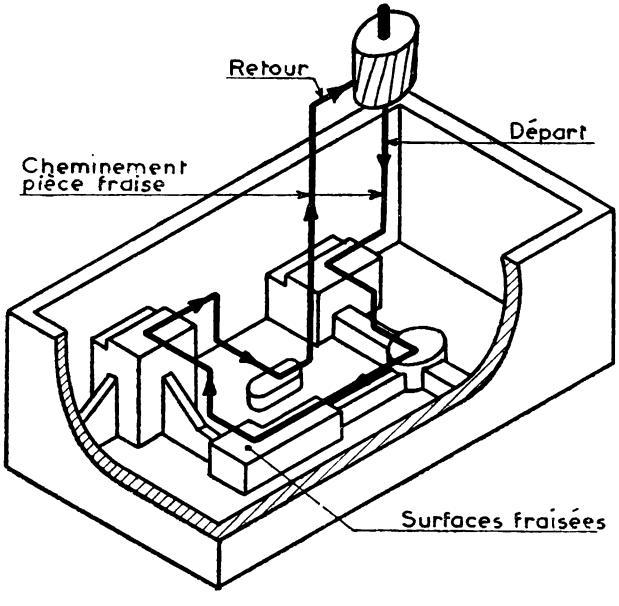


Fig:80- Usinage intérieur d'un carter par fraisage en cycle cubique.

III. — FRAISAGE AUTOMATIQUE A CYCLE DIT CUBIQUE

Ce procédé est permis par l'équipement électronique de la fraiseuse. La fraise et la pièce cheminent suivant des plans orthogonaux ou parallèles, ce qui permet l'usinage automatique en circuit fermé des faces d'une pièce telle que celle de la figure 80.

Le cycle obtenu automatiquement comprend trois déplacements orthogonaux et, par suite, il est dit cubique.

---

(1) Voir le tournage par reproduction pour plus amples détails sur un reproducteur hydraulique.

Le brochage

I. — PRINCIPE DU BROCHAGE

Pour réaliser un plan étroit par rabotage, on peut imaginer plusieurs outils-pelles (outils de forme) placés l'un derrière l'autre, travaillant simultanément (fig. 81). Le décalage de chaque outil est fonction de la ténacité du métal usiné, de la section du copeau, de la puissance de la machine et enfin de la résistance de l'outil.

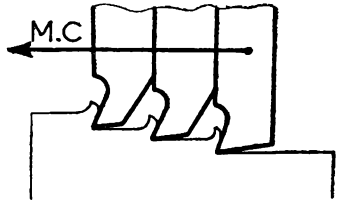


Fig:81–Rabotage avec 3 outils en série

On évite les difficultés de montage de ces outils accolés en utilisant un outil-bloc (fig. 82), dont le décalage des arêtes actives est obtenu par l'affûtage. L'épaisseur à enlever conditionne alors un nombre de passes réduit. Pour le réduire encore, on peut imaginer un outil-bloc très long, portant de nombreuses dents, dont quelques-unes seulement sont en prise (3 par exemple) et qui taillent chacune un copeau de faible épaisseur, afin de limiter l'effort de coupe. La course de cet outil est donc plusieurs fois supérieure à la longueur de la surface à façonner, mais l'usinage est réalisé en une seule passe. Cet outil s'appelle **une broche** (fig. 83) et l'opération réalisée est **le brochage.**

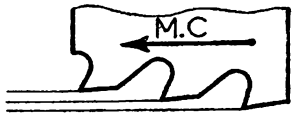


Fig:82- Outil-bloc à trois arêtes coupantes.

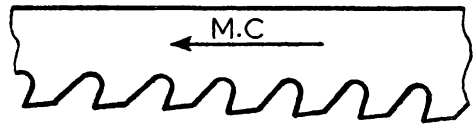


Fig:83–Forme générale d'une broche

II. — ÉTUDE D'UNE BROCHE

A. MODE D'ACTION D'UNE BROCHE (fig. 84).

Les dents d'une broche sont disposées et affûtées de façon à déterminer successivement sur sa longueur :

— une section (un groupe) **d'ébauche,** qui taille les plus gros copeaux;

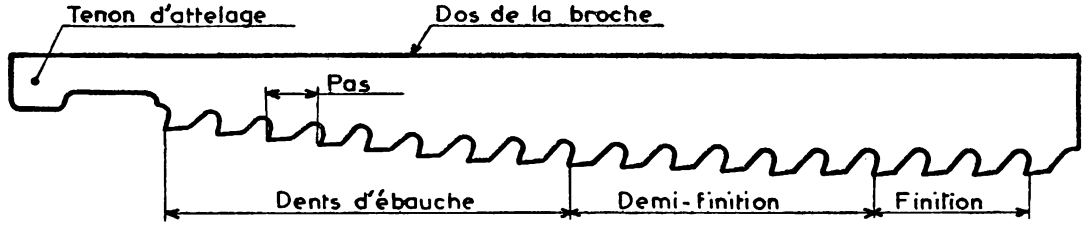


Fig:84- Disposition de la denture d'une broche.

— puis une section (un groupe) **de demi-finition** qui taille des copeaux plus minces;

— et enfin une section (un groupe) **de finition,** ou **partie calibrante,** où toutes les dents sont sur un même plan parallèle au dos de la broche. En principe, ces dents ne coupent pas de métal, elles permettent les réaffûtages successifs sans diminution de la cote finale.

Chaque dent est un outil-pelle élémentaire (fig. 85), qui présente les angles caractéristiques de coupe **a** et θ habituels.

Le dos de la broche prend appui sur une surface de guidage servant de référence.

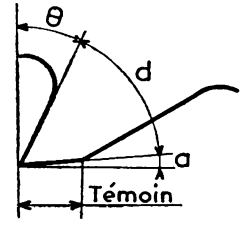


Fig:85- Angles caractéristiques d'affûtage d'une dent de broche.

B. ACTION ET RÉACTION DE LA PIÈCE ET DE L'OUTIL (fig. 86).

Sur chaque dent en prise, le métal exerce l'effort de coupe $\mathbf{f}_c$ et l'effort de pénétration $\mathbf{f}_p$ qui ont pour résultante **f.** La résultante totale de ces efforts est $\mathbf{F} = \mathbf{nf}$, **n** étant le nombre de dents en prise. La broche réagit suivant **R,** opposée à **F.**

La réaction **R** est la composante de l'effort de traction ou de poussée $\mathbf{R}_c$ de la broche suivant que l'on travaille en tirant ou en poussant et de l'effort normal de contact $\mathbf{R}_p$ de l'appui sur le dos de la broche (en négligeant le frottement de cet appui).

Remarques. — 1° Lorsque la pièce présente deux faces à brocher opposées et parallèles, les efforts $\mathbf{F}_p$ s'équilibrent (fig. 87) et l'effort de traction devient $\mathbf{T} = 2\mathbf{R}_c$. La broche est dite symétrique.

2° Si la pièce ne présente pas deux faces opposées, on peut, dans un montage, placer deux pièces face à face et les brocher à l'aide d'une même broche.

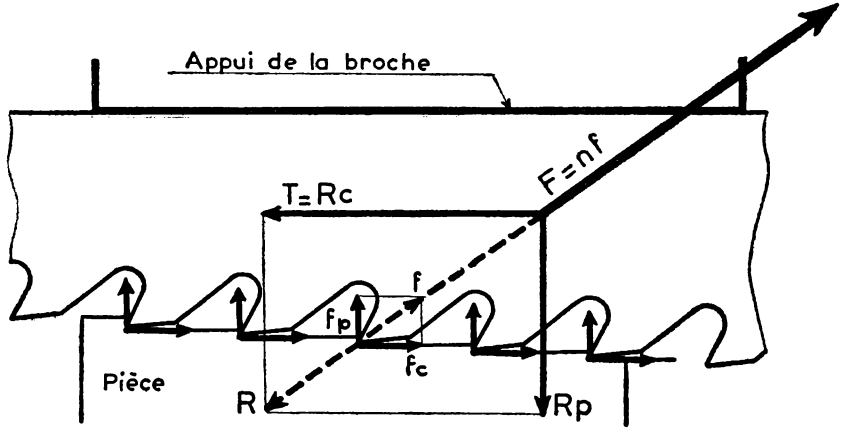


Fig:86- Action et réaction de la pièce et de l'outil.

3° Lorsque la longueur d'arête coupante en prise est grande, on peut rendre constant l'effort de traction et diminuer sa valeur maximum en inclinant les dents et en pratiquant des brise-copeaux

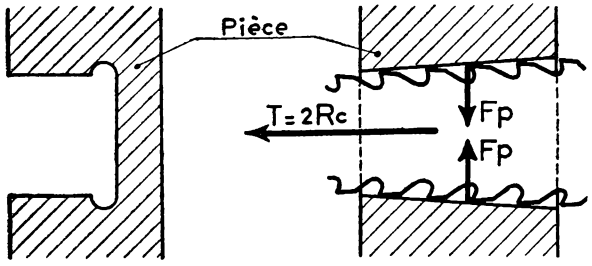


Fig:87- Sur une broche symétrique les efforts de pénétration Fp s'équilibrent.

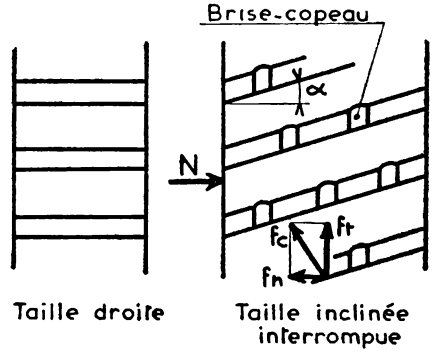


Fig:88- Différentes tailles de broches

alternés qui facilitent le dégagement des copeaux (fig. 88). On retrouve là le même principe que sur les fraises à taille hélicoïdale. L'effort de traction est $\mathbf{F}_t = \mathbf{F}_c \times \cos \alpha$. Mais il faut équilibrer l'effort transversal $\mathbf{F}_n$ par une butée qui réagit suivant **N**.

C. BROCHE POUR BROCHAGE INTÉRIEUR.

C'est à l'occasion du dressage de surfaces intérieures que le brochage a reçu ses premières applications, précédé d'ailleurs par **le mandrinage.**

Le mandrinage, utilisé depuis très longtemps par les mécaniciens, consiste à calibrer une mortaise ébauchée à la main, à l'aide d'un mandrin.

Le mandrin (fig. 89) est un prisme d'acier dur trempé sur lequel on a taillé des dents, suivant une section droite ou oblique et sur chaque face. Le mandrin est passé de force par chocs, ou mieux par pression, dans la mortaise ébauchée.

Sur une broche pour surfaces intérieures, les dents disposées comme le montre la figure 90 sont précédées et suivies de parties lisses, ou guides, ou encore pilotes.

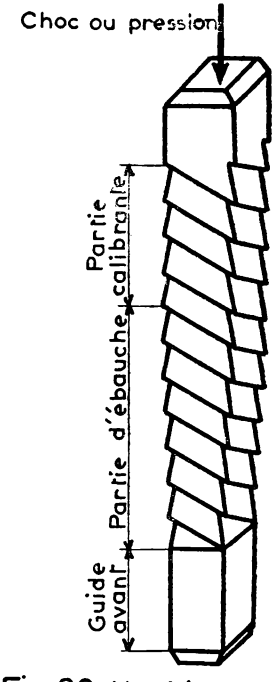


Fig:89- Mandrin pour mortaise carrée

Les efforts de pénétration F_p s'équilibrent puisque la broche coupe sur tout son pourtour; seul subsiste l'effort axial. L'outil travaille le plus souvent en tirant, ce qui évite son flambage et permet de disposer d'un plus grand nombre de dents.

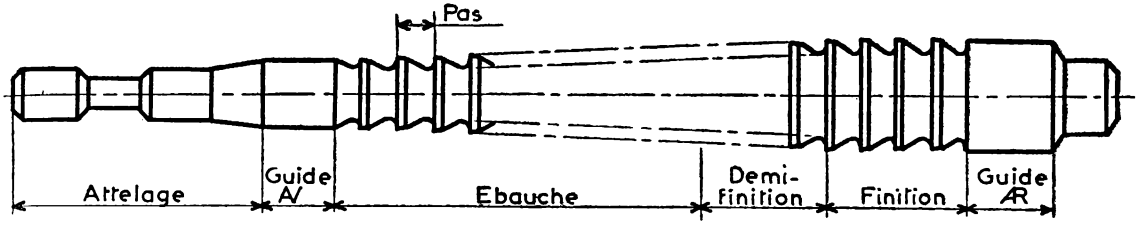


Fig:90- Broche en tirant pour brochage intérieur.

D. CARACTÉRISTIQUES D'UNE BROCHE.

Une broche est caractérisée par sa forme, son nombre de dents, son pas et sa longueur

1° Forme. La forme utile de la broche est évidemment déterminée par la forme du contour à obtenir (fig. 91 et 92)

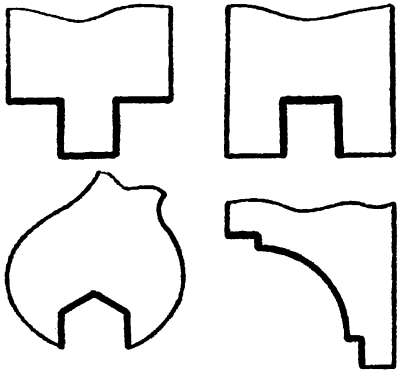


Fig:91- Formes obtenues par brochage extérieur.

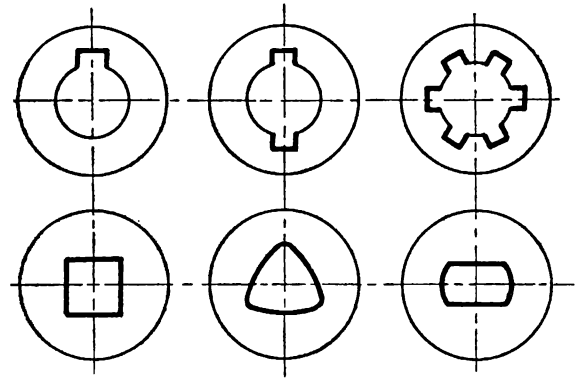


Fig:92- Formes obtenues par brochage intérieur.

2° Nombre de dents. Le nombre de dents **n** est déterminé par le quotient de l'épaisseur **E** de métal à enlever sur une face par l'épaisseur **e** du copeau taillé par chaque dent (fig. 93).

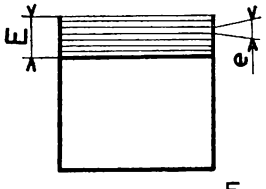


Fig:93- n dents $= \frac{E}{e}$

Cette épaisseur du copeau, ou **progression de la broche,** ne peut pas être inférieure au copeau taillé minimum. Elle dépend de la nature du métal usiné et peut être comprise entre :

0,02 et 0,05 *mm* pour l'acier dur;
0,05 et 0,1 *mm* pour l'acier mi-dur;
0,07 et 0,15 *mm* pour la fonte mécanique;
0,08 et 0,2 *mm* pour l'aluminium, le laiton et le bronze.

Exemple : Pour $\mathbf{E} = 3$ *mm* et $\mathbf{e} = 0{,}06$ *mm*, on aura $\mathbf{n} = 3 : 0{,}06 = 50$ dents, auxquelles il faut ajouter 3 ou 4 dents calibrantes.

3° **Le pas.** Le pas (fig. 94) est la distance entre deux dents consécutives. Il est déterminé par application des règles suivantes :

a) Il faut qu'il y ait toujours au moins deux dents en prise pour que la dent qui entre n'accroche pas.

b) L'entre-dent doit pouvoir contenir le copeau sans que celui-ci soit comprimé. Or le copeau est d'autant plus volumineux que la longueur **L** de brochage (épaisseur de la pièce) est plus grande et que la matière est plus malléable : ainsi, les copeaux d'acier et d'aluminium sont plus volumineux que les copeaux de fonte et de bronze.

Les formules suivantes donnent approximativement le pas **P:**

$$\text{pour } \mathbf{L} \geqslant 25\ mm, \quad \mathbf{P} = 2\sqrt{\mathbf{L}}\ ;$$
$$\text{pour } \mathbf{L} < 25\ mm, \quad \mathbf{P} = 0{,}4\,\mathbf{L}.$$

Exemple : Pour $\mathbf{L} = 45$ *mm*, on aura $\mathbf{P} = 2 \times \sqrt{45} \simeq 2 \times 7 \simeq 14$ *mm*. Il y aura donc trois dents en prise au minimum et parfois quatre.

c) Pour que la broche puisse résister en toute sécurité à l'effort de traction **T**, on doit avoir :

$$\mathbf{T} = \mathbf{l} \times \mathbf{n} \times \mathbf{e} \times (\mathbf{Rr})_e \times \mathbf{k} \leqslant \mathbf{R}_e \times \mathbf{S}$$

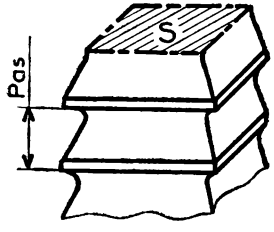


Fig. 94. - Section à fond de dent

Dans cette relation :

- **l** = périmètre du brochage ;
- **e** = épaisseur du copeau ;
- **n** = nombre de dents en prise ;
- $(\mathbf{Rr})_e$ = résistance à la rupture du métal broché ;
- **k** = coefficient de 3 à 6 suivant la structure du métal broché et la lubrification ;
- $\mathbf{R}_e$ = résistance pratique à la traction du métal constituant la broche ;
- **S** = section minimum en mm^2 à fond de dent (fig. 94).

Exemple : Brochage d'une pièce en acier demi-dur avec une broche en A.R.E.S. pour mortaise carrée de 30 *mm* de côté, trois dents en prise, copeau de 0,06 d'épaisseur, section carrée à fond de dent de 20 de côté :

$$\begin{aligned} \mathbf{T} = \quad & \mathbf{l} \times \mathbf{n} \times \mathbf{e} \times (\mathbf{Rr})_e \times \mathbf{k} \quad \leqslant \mathbf{R}_e \times \mathbf{S} \\ = \quad & (30 \times 4) \times 3 \times 0{,}06 \times 55 \times 4 \leqslant 15 \times 20^2 \\ = \quad & 4\,752\ kgf \quad \leqslant 6\,000\ kgf \\ = \quad & 46\,617\ N \quad \leqslant 58\,860\ N \end{aligned}$$

La broche peut donc résister. S'il en était autrement, il faudrait augmenter le pas de la broche afin de diminuer le nombre de dents en prise.

4° **Longueur.** La longueur utile de la broche est le produit du pas par le nombre de dents.

Les exemples précédents donnent $\mathbf{P} = 14$ *mm* et $\mathbf{n} = 50 + 4$. La longueur utile est donc $14 \times 54 = 756$ *mm*. Cette longueur est normale pour une broche utilisée en tirant. Si la broche était utilisée en poussant, il faudrait contrôler sa résistance au flambement.

Remarques. — 1° Lorsque la broche est taillée sur une, deux ou trois faces, il est facile d'augmenter sa section pour la rendre plus résistante. 2° Si la broche ne travaille que sur une seule face on peut, pour diminuer l'effort de traction, adopter la taille inclinée (fig. 88).

III. — VITESSE DE COUPE D'UNE BROCHE

On adopte le plus souvent les vitesses de coupe suivantes :

— 0,5 à 2 *m/mn* pour les aciers spéciaux de construction et les fontes dures spéciales;

— 2 à 4 *m/mn* pour les aciers au carbone et les fontes mécaniques ordinaires;

— 4 à 8 *m/mn* pour le bronze, le laiton et les alliages légers.

Une lubrification abondante est absolument nécessaire si on veut retarder l'usure de la broche, surtout pour le brochage intérieur, afin de produire le plus grand nombre de pièces avant d'atteindre la cote mini. De plus, l'affûtage est long et délicat, et il exige des machines spéciales.

Les liquides d'arrosage couramment utilisés sont :

— l'huile soluble pour les bronzes, laitons et alliages légers;

— l'huile soluble ou le pétrole pour les fontes;

— l'huile de coupe pour les aciers.

LES MACHINES A BROCHER

Les figures 95 et 96 sont les schémas de principe de machines à brocher horizontales et verticales. Ces machines sont relativement simples, car elles n'ont à assurer que le mouvement de coupe, relativement lent.

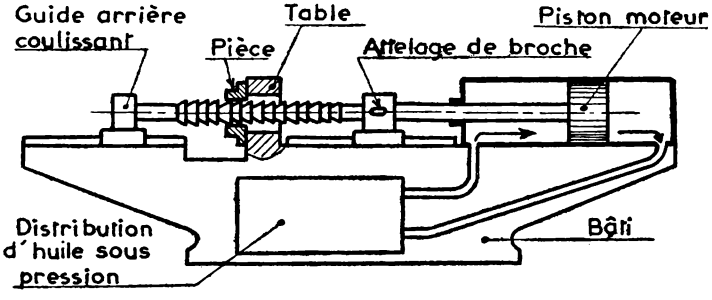


Fig:95- Schéma d'une machine à brocher horizontale.

Les machines de petites dimensions sont souvent à commande mécanique par vis et écrou. Celles de grandes courses et à forte puissance sont à commande hydraulique en raison des gros avantages qu'apporte ce système :

— souplesse de la commande ;

— limitation de l'effort de traction, ce qui permet de prévenir la rupture de la broche (une broche coûte très cher) ;

— retour rapide.

Certaines machines verticales possèdent deux coulisseaux porte-broche à mouvements alternés dans le but d'éviter le retour rapide.

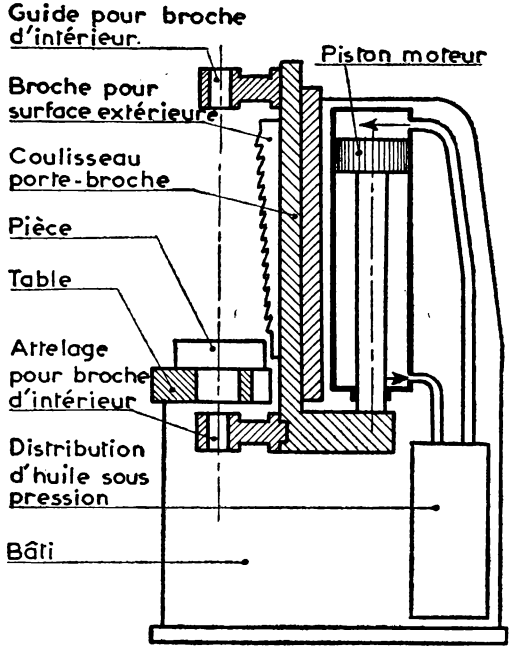


Fig:96- Schéma d'une machine à brocher verticale

TRAVAUX DE BROCHAGE

Le brochage a pris ces dernières années une grande extension, car il permet des états de surface très corrects. Ainsi, la profondeur des défauts est d'environ 5μ et la précision des cotes est de l'ordre de 0,01 *mm*. De plus, une broche peut usiner jusqu'à 30 000 pièces avant usure, ce qui, malgré le coût élevé des broches, maintient le prix de revient du brochage à un taux très bas. Aucun autre moyen de production à l'outil de coupe à copeaux taillés ne présente ces avantages.

I. — BROCHAGES EXTÉRIEURS

Le brochage extérieur est obtenu le plus souvent sur machines verticales, en raison de la commodité de fixation de la pièce sur la table horizontale.

A. BROCHAGE D'UNE SURFACE PLANE.

On utilise une broche taillée sur une seule face. L'outil peut attaquer la pièce :

— soit de front (fig. 97-1), la broche s'appelle alors **broche frontale** et sa progression est normale à la surface ;

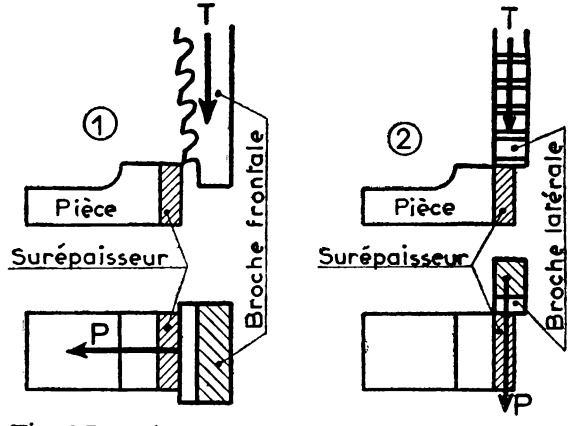


Fig:97- Réalisation du plan
① : Par brochage frontal
② : Par brochage latéral
P : Sens de progression des broches

— soit de flanc (fig. 97-2), la broche est dite alors **broche latérale** et sa progression est parallèle à la surface.

Le brochage latéral est surtout appliqué aux pièces brutes. La surépaisseur n'étant pas constante, on risquerait en effet au moment de l'attaque par broche frontale de briser la première dent de la broche en lui imposant un effort trop important. De plus, la broche frontale attaque sur une longueur d'arête beaucoup plus importante que la broche latérale.

B. COMBINAISON DE BROCHES.

1° Pour une surface plane.

Une surface plane peut être brochée par la combinaison de deux broches latérales (fig. 98) qui ébauchent la surface et d'une broche frontale qui la finit. On a ainsi un effort minimum et une plus grande durée du service des outils.

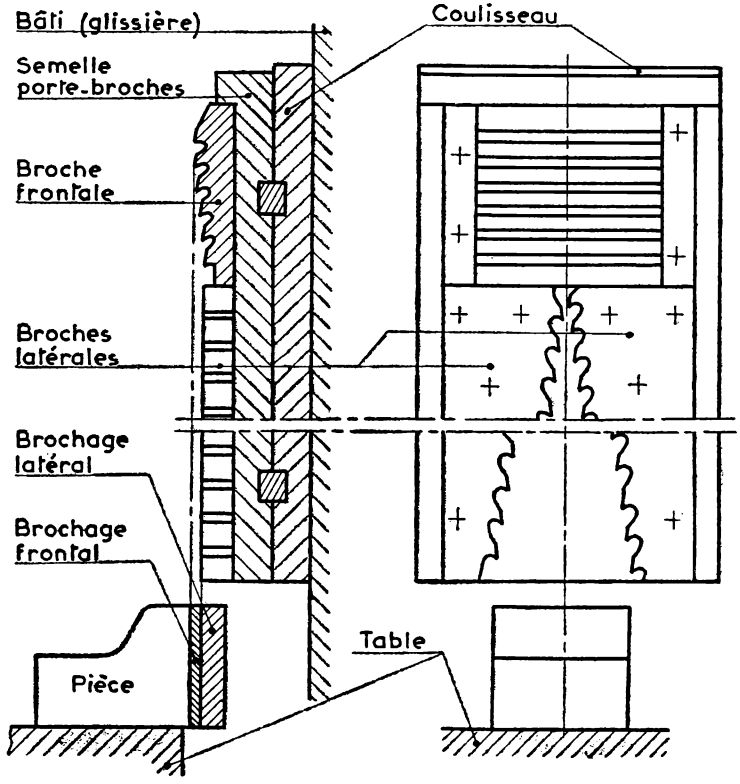


Fig.98— Combinaison de broches frontales et de broches latérales.

2° Pour surfaces planes associées.

Des surfaces planes associées peuvent être brochées par combinaison de broches montées comme l'indiquent les figures 99 et 100.

La figure 99 représente le profilage d'un chapeau de bielle d'automobile (fabrication en série illimitée). Pour une petite série, un tel usinage serait obtenu par train de fraises, car une broche ne peut s'amortir que sur une grande quantité de pièces.

La figure 100 montre des broches taillées sur une ou sur deux faces latérales, disposition applicable quand les surfaces associées sont de petites dimensions.

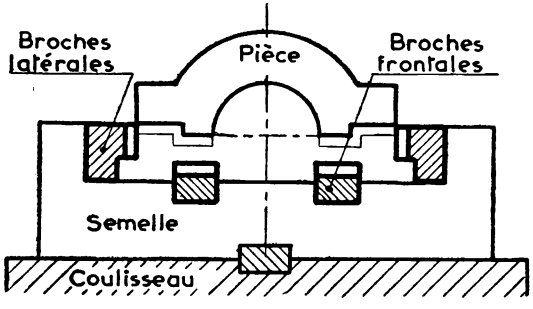


Fig:99_ Profilage d'un chapeau de tête de bielle par broches combinées.

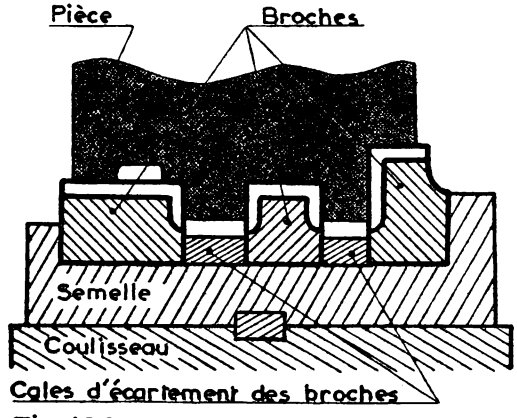


Fig:100_ Schéma de principe d'un assemblage de broches pour profilage.

C. BROCHAGE DE SURFACES QUELCONQUES.

La broche étant un outil de forme, on peut donner aux arêtes coupantes le profil droit ou courbe que l'on désire. Il s'ensuit évidemment des difficultés accrues pour l'affûtage des dents. Lorsque le brochage ne peut être réalisé en une passe (effort de traction trop important et, par suite, trop grande longueur de broche), on exécute le travail en deux et même trois passes.

II. — BROCHAGES INTÉRIEURS

Le brochage intérieur est généralement pratiqué sur machines horizontales, car il faut en effet désaccoupler la broche pour passer la pièce, surtout pour les broches de grande longueur (jusqu'à 1,20 m). Ces machines travaillent en tirant et on n'a pas à craindre le flambement de la broche.

A. BROCHAGE DE TROUS PRISMATIQUES DE FORMES DIVERSES.

Le guide avant de la broche s'engage dans le trou d'ébauche préalable inscrit dans la surface (fig. 101). La pièce, folle sur le porte-pièce, se centre d'elle-même.

Lorsque la pièce est mince et qu'elle ne peut résister aux efforts latéraux sans se déformer, elle est placée dans un montage qui absorbe ces efforts et évite des déformations (fig. 102). On peut aussi empiler dans le montage plusieurs pièces, accolées et serrées, ce qui empêche les dents d'accrocher pour une épaisseur de pièce plus faible que la grandeur du pas de la broche.

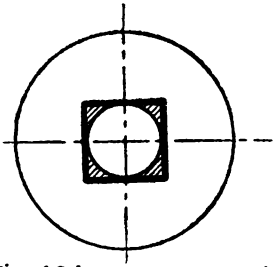


Fig.101- Mortaise carrée ébauchée par perçage.

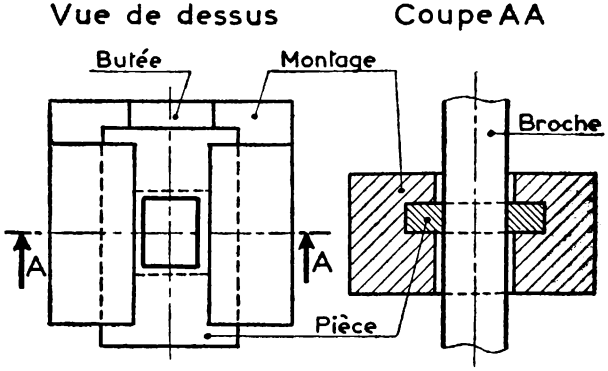


Fig.102- Pièce brochée dans un montage.

B. BROCHAGE DE TROUS PYRAMIDAUX.

Pour montrer les ressources du brochage, citons le cas de brochage de trous pyramidaux.

Un trou pyramidal de base carré (fig. 103) est réalisé en quatre passes. La pièce est montée sur un guide incliné, de façon à respecter la pente demandée (fig. 104). A chaque passe, la broche taille un angle du carré sur la moitié de chacun de ses deux côtés. Le premier angle taillé sert de référence au guide pour le brochage des trois autres.

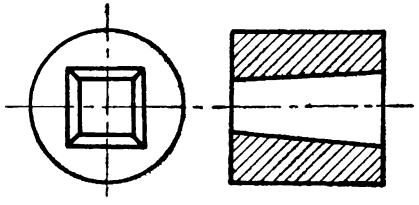


Fig.103- Trou pyramidal.

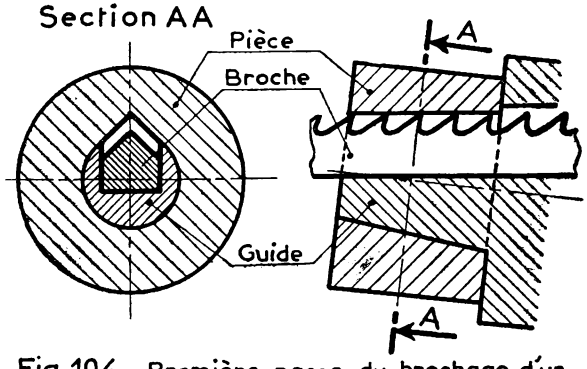


Fig.104- Première passe du brochage d'un trou pyramidal carré.

Obtention du plan par tournage

I. — GÉNÉRATION DU PLAN PAR TOURNAGE

La génératrice **G** résulte du mouvement d'avance de l'outil qui se fait perpendiculairement à la directrice Δ, qui n'est autre que l'axe de la broche support de pièce.

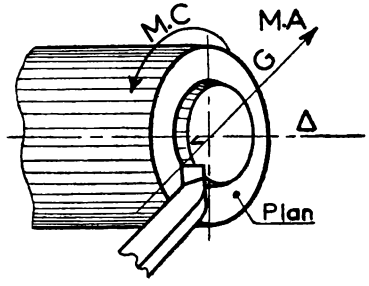


Fig:105- Génération du plan par tournage

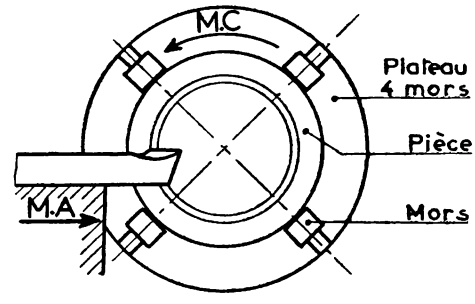


Fig:106- Surfaçage plan au tour.

II. — RÉALISATION PRATIQUE (1)

A. SUR TOUR HORIZONTAL.

La pièce est prise en mandrin à serrage concentrique ou montée en plateau (fig. 106) et l'outil utilisé est un outil à charioter ou à dresser.

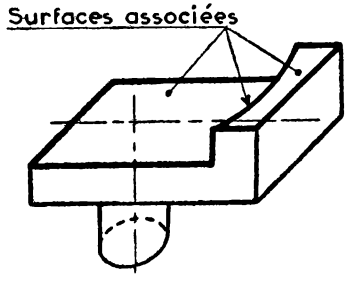


Fig:107- Surfaces associées réalisables par tournage.

Lorsque la surface est un cercle ou une couronne circulaire plane, la coupe est continue, ce qui assure le rendement maximum. Dans ce cas, le tour est la machine-outil qui convient le mieux. Il est bon cependant de remarquer que la vitesse angulaire étant la même en tous points de la pièce, la vitesse de coupe diminue progressivement en se rapprochant du centre. Il faut donc munir le tour d'un variateur de vitesse pour maintenir la vitesse de coupe à sa valeur optima.

Lorsque la surface se différencie nettement du cercle (fig. 107). le procédé n'est pas économique, car il y a un temps mort considérable (fig. 108) et les chocs successifs à l'attaque de l'outil altèrent la précision. De plus, il faut

(1) L'étude des outils et de l'équilibre pièce-outil a été faite précédemment. Voir classe de 1re, Étude fonctionnelle des machines-outils.

procéder à un équilibrage statique et dynamique du plateau (voir équilibrage des pièces montées en plateau, fig. 230 et 231). Il est parfois préférable, dans de tels cas, d'opérer sur fraiseuse équipée d'un plateau circulaire.

Sur tour horizontal, le montage des pièces lourdes et volumineuses est long, peu pratique

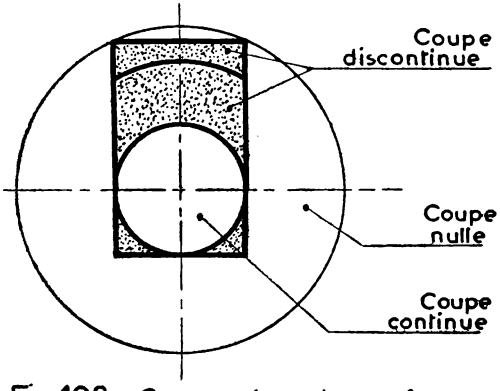


Fig.108- Comparaison des surfaces où la coupe est nulle, continue ou discontinue.

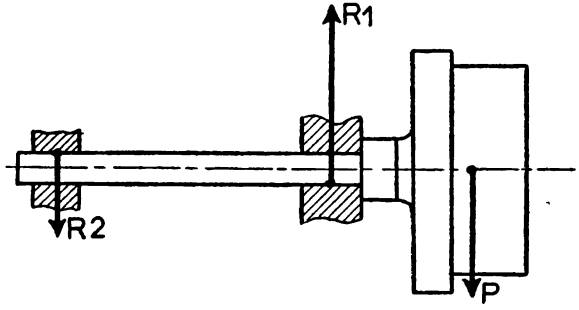


Fig.109- Réactions des paliers de la broche sous l'action du poids de l'ensemble plateau—pièce.

et l'appareil de levage parfois nécessaire gêne l'opération. En outre, le poids de l'ensemble plateau-pièce fatigue énormément la broche et le palier avant (fig. 109). Il est plus rationnel d'opérer sur un tour vertical.

B. SUR TOUR VERTICAL.

1° Le support de pièce.

Le plateau support de pièce est horizontal et s'appuie sur une ou deux couronnes de contact (fig. 110). Ainsi l'arbre de centrage est vertical et il ne subit aucune contrainte de flexion. Le montage des pièces est facile et se fait souvent par appui direct sur le plateau.

L'entraînement du plateau est obtenu par un pignon attaquant intérieurement une couronne de grand diamètre. Ce dispositif élimine toute contrainte de torsion de l'arbre du plateau.

Le diamètre du plateau est la caractéristique d'un tour vertical. Il peut varier de 1 *m* environ à 16 *m*.

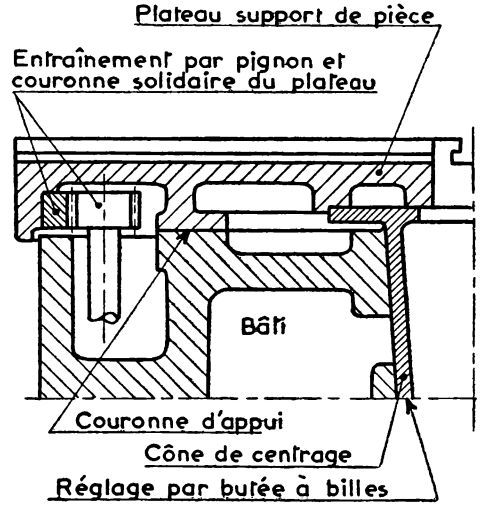


Fig.110- Schéma de montage d'un plateau de tour vertical.

2° Les supports d'outils.

Le tour à deux montants (fig. 111) reçoit :

— deux chariots de traverse (chariots supérieurs) munis de tourelles à cinq ou six faces ;

— deux chariots de montant (chariots latéraux) munis de tourelles à 4 faces.

Le tour à un seul montant ne reçoit qu'un jeu de chariots.

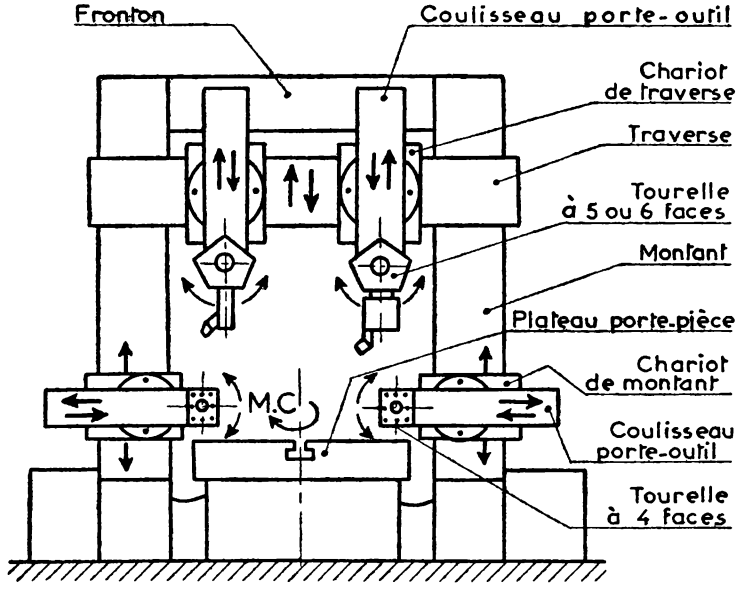


Fig.111- Schéma d'un tour vertical à deux montants.

Tous les chariots peuvent travailler simultanément. Cette particularité, qui ne s'applique pas au tour parallèle, assure une grande production. De plus, le tournage conique est possible, chaque chariot étant monté sur une semelle circulaire pivotante. Enfin, un chariot ou deux permettent le filetage.

Remarque. — Nous traiterons l'usinage au tour vertical de pièces de grandes dimensions au chapitre " Obtention des surfaces cylindriques ".

LES TRAVAUX DE PERÇAGE

Par perçage, on entend généralement un procédé d'**obtention de surfaces cylindriques intérieures (trous) en pleine matière,** c'est-à-dire sans ébauche préalable.

Le perçage est un usinage très fréquent en construction mécanique :

— soit qu'il s'agisse de trous qui ne réclament pas une grande précision et qui peuvent être utilisés directement;

Ex. : passages de boulons, de rivets, trous à tarauder, ébauches de mortaises, trous d'allègement d'un organe...

— soit qu'il constitue l'ébauchage d'une opération d'alésage destinée à réaliser une surface intérieure précise.

I. — OUTILS DE PERÇAGE

A. FORET HÉLICOIDAL (fig. 112).

Deux goujures hélicoïdales déterminent les faces d'attaque de l'outil en même temps qu'elles servent de canaux de dégagement des copeaux. Les deux faces en dépouilles sont les seules qui reçoivent un affûtage dont le contrôle s'exerce sur :

— les angles de dépouille;

— l'angle de pointe α variable avec le métal à percer (voir tableau n° 1);

— les deux arêtes coupantes qui doivent avoir même longueur et même inclinaison sur l'axe.

L'affûtage à la main qui ne peut pas respecter ces conditions doit donc faire place objectivement à l'affûtage mécanique sur machine spéciale.

La périphérie de l'outil est dégagée pour ne laisser que deux listels qui maintiennent le centage de l'outil pendant le perçage par leur contact avec la surface du trou. Le diamètre est plus gros vers la pointe que vers la queue

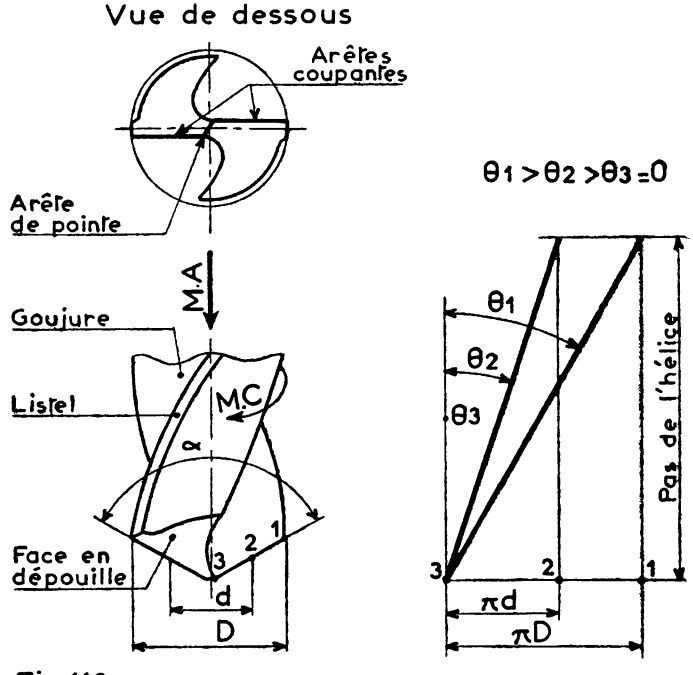


Fig. 112 – Foret hélicoïdal et variation de son angle de pente effective de coupe.

pour éviter le coincement du foret au cours du perçage. La conicité est de 0,01 % environ.

L'angle de pente effective de coupe dépend de l'angle d'inclinaison de l'hélice. Cependant, pour le même foret, il varie tout au long de l'arête coupante : il est maximum au point 1 pour devenir nul, ou à peu près, au point 3. Il s'ensuit que, aux environs de la pointe, l'outil coupe mal.

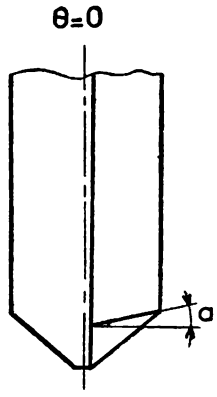


Fig. 113 - Foret à cannelures droites pour bronze et laiton.

Quant à l'arête de pointe (fig. 112), dont la longueur varie avec l'épaisseur de l'*âme* du foret, elle ne possède aucune des caractéristiques de l'outil de coupe. C'est l'arête d'un coin très obtus qui, pressée sur le métal tout en tournant, le désagrège s'il est friable, comme la fonte douce par exemple. Si le métal est fibreux et tenace, il est allongé, écroui et refoulé vers les arêtes coupantes. L'effort de pénétration de la pointe est donc très grand par rapport aux efforts appliqués aux arêtes coupantes.

Pour percer le bronze et le laiton, qui nécessitent une pente effective de coupe nulle, les forets sont à cannelures droites (fig. 113).

Angles caractéristiques d'un foret.

Les angles caractéristiques d'un foret varient d'après les propriétés mécaniques du métal à percer. Leurs valeurs moyennes sont indiquées par le tableau n° 1 ci-dessous.

MÉTAL A PERCER	VALEUR DES ANGLES			LUBRIFIANTS
	de pente effective de coupe	de pointe	de dépouille	
Métaux légers	30 à 40°	140°	10°	Huile soluble ou huile de coupe
Cuivre	35°	118 à 120°	10°	
Aciers HB $\leqslant$ 70 kg/mm² ...	20 à 30°	118 à 120°	6°	
Aciers HB $>$ 70 kg/mm²....	10 à 15°	130°	10°	
Fonte grise.....	20 à 30°	118 à 120°	12°	à sec
Magnésium	25°	130°	10°	à sec
Bronze et laiton.....	0 à 10°	118 à 120°	12°	à sec ou huile soluble
Marbre, ardoise.....	12°	80°	12°	à sec
Matières plastiques.....	12°	80°	12°	à sec

Tableau n° 1. — Angles caractéristiques d'un foret et sa lubrification suivant la matière à percer.

B. PORTE-LAME ET MÈCHE A PILOTE (fig. 114 et 115).

Le porte-lame et la mèche à pilote sont utilisés pour effectuer :

— **des chambrages** (fig. 114 et 115) à fond plat ou à fond conique selon l'inclinaison des arêtes coupantes (chambrage pour tête de vis par exemple);

— **des lamages** qui sont des chambrages peu profonds ou des couronnes circulaires formant bossages (fig. 116).

Le trou préalablement percé sert de guide au pilote porté par l'outil, de sorte que l'opération n'est pas un perçage direct.

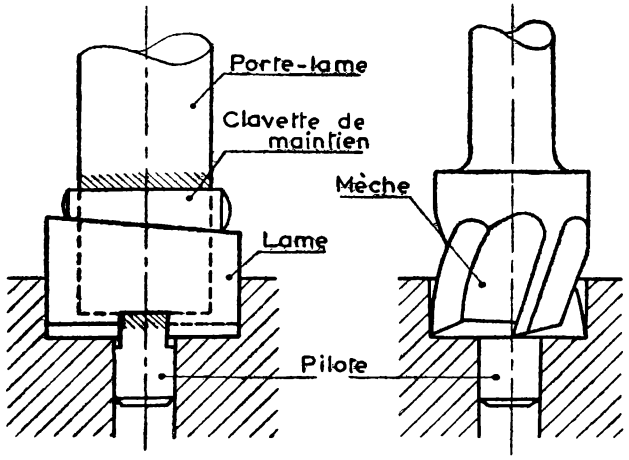


Fig:114 – Lame et porte-lame.

Fig:115 – Mèche à pilote.

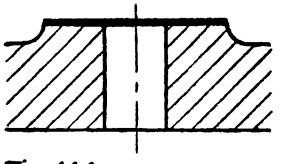


Fig:116 – Bossage lamé

C. FORETS SPÉCIAUX POUR PERÇAGES PROFONDS.

Il existe, pour perçages profonds, des forets hélicoïdaux dits **série longue.** Leur utilisation nécessite des débourrages fréquents des copeaux qui, se dégageant mal, peuvent provoquer la rupture du foret.

Les forets spéciaux (fig. 117) sont utilisés pour le perçage de trous très profonds (perçage d'une broche de tour par exemple). Le liquide d'arrosage arrive sous pression vers l'arête coupante par un canal d'arrosage et s'échappe par l'encoche longitudinale pratiquée dans le corps du foret et dans la rallonge en entraînant les copeaux.

Cet outil ne peut être utilisé qu'après avoir amorcé le perçage avec un foret hélicoïdal de même diamètre.

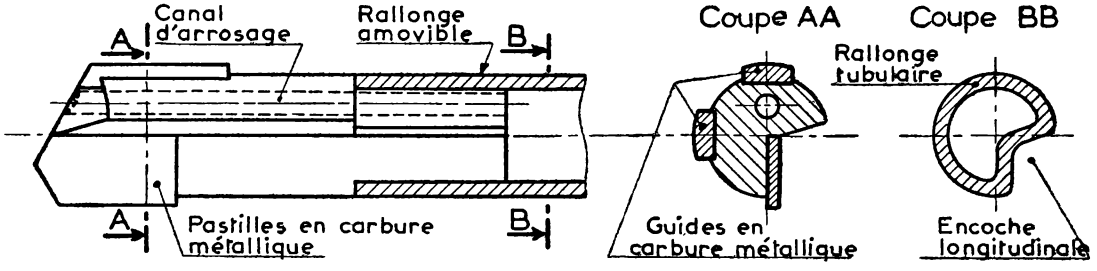


Fig:117 – Foret spécial pour trous profonds.

CONDITIONS DE COUPE DES FORETS

A. VITESSE DE COUPE.

Le foret hélicoïdal doit toujours travailler à la vitesse de coupe économique :

$\mathbf{V}m/mn = \dfrac{\pi \mathbf{DN}}{1\,000}$ où **D** est le diamètre du foret.

B. SECTION DU COPEAU COUPÉ PAR CHAQUE ARETE.

Elle a pour valeur $\mathbf{S}mm^2 = \dfrac{\mathbf{D}}{2} \times \dfrac{\mathbf{a}}{2} = \dfrac{\mathbf{Da}}{4}$, dans laquelle **a** est l'avance par tour.

C. EFFORTS DE COUPE.

Pour un foret bien affûté travaillant un métal homogène, on a (fig. 118) :

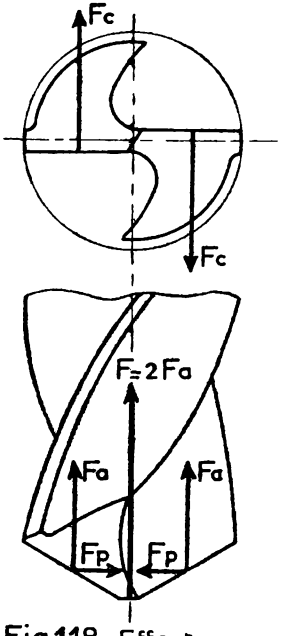


Fig.118- Efforts sur un foret bien affûté.

— deux efforts $\mathbf{F}_c$ égaux qui forment un couple de moment : $\mathbf{M} = \mathbf{F}_c \times \dfrac{\mathbf{D}}{2}$;

— deux efforts $\mathbf{F}_p$ égaux qui s'équilibrent ;

— deux efforts $\mathbf{F}_a$ égaux qui s'ajoutent et dont la résultante : $\mathbf{F} = 2\mathbf{F}_a$.

Pour une même avance, les contraintes de compression et de torsion subies par le foret augmentent quand le diamètre diminue. Ceci explique que les petits forets se brisent plus facilement que les gros, parce qu'on ne peut pas descendre au-dessous de l'avance correspondant au copeau minimum.

Pour un même diamètre, la contrainte de compression est proportionnelle à l'avance, mais la contrainte de torsion est proportionnelle à son carré. C'est la raison pour laquelle l'avance ne varie pas en fonction directe du diamètre.

Ex. : Dans la fonte, pour un foret en A.R.S., l'avance est de 0,5 *mm* environ pour un foret de 15 à 25 et de 0,8 seulement pour un foret de 60 à 100, de sorte qu'on a : $\dfrac{0{,}4^2}{0{,}8^2} = \dfrac{15}{60}$.

En première approximation, on peut prendre, pour l'avance par tour, le $\dfrac{1}{100}$ du diamètre du foret.

D. ÉVACUATION DES COPEAUX.

Le volume de copeaux correspondant à une profondeur de perçage **P** ne peut pas se loger dans les goujures du foret correspondant à la même longueur **P**. Il faut donc que les copeaux glissent vers l'extérieur et ceci d'autant plus vite que l'avance du foret est plus grande et que la différence entre le volume percé et le volume des goujures est également plus grande. Il

résulte de cette remarque que l'avance et la profondeur percée ne peuvent être augmentées sans courir le risque de voir les copeaux bourrer dans le foret et entraîner sa rupture. Il est donc nécessaire, au cours du perçage, de retirer le foret périodiquement pour assurer le dégagement des copeaux et permettre en même temps l'arrivée du lubrifiant jusqu'aux arêtes coupantes.

E. ARROSAGE.

De même que pour les autres travaux de coupe, l'arrosage favorise le travail du foret et retarde son usure. Mais le liquide de coupe gêné par les copeaux circule mal et arrive échauffé aux arêtes coupantes. La partie active du foret est donc mal refroidie.

Or, aux points 1 et 2 (fig. 119), il y a frottement du listel contre la paroi du trou qui lui sert de guide et c'est en ces points que le volume de copeaux enlevé est le plus grand. Par suite, la température y est vite très élevée et l'usure s'y manifeste en priorité. Dès qu'elle est marquée, le listel s'engorge sans couper dans un logement conique où il coince, la température augmente rapidement (1) et l'usure s'amplifie brutalement jusqu'à la rupture. Il faut donc affûter fréquemment le foret pour l'éviter.

Ceci explique que, pour les perçages profonds, on ait recherché le moyen d'amener le liquide d'arrosage directement aux arêtes coupantes par des tubes qui traversent le foret sur toute sa longueur.

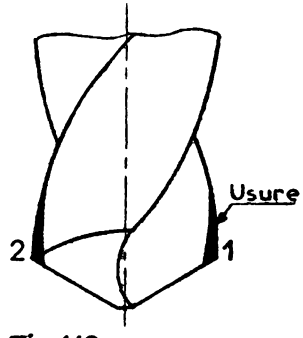


Fig:119- Usure prononcée du foret.

LES MACHINES A PERCER

Les types de machines à percer varient d'après le diamètre de perçage, le poids et l'encombrement des pièces à usiner et la précision du perçage.

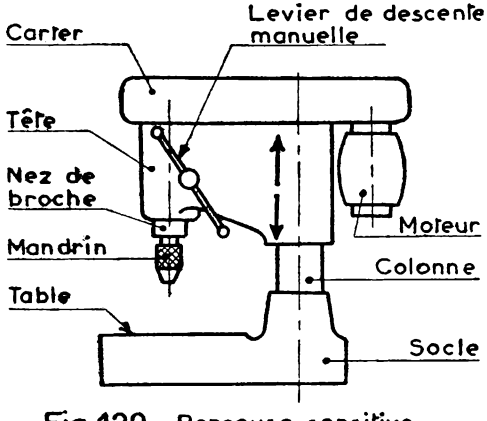


Fig:120- Perceuse sensitive.

I. — PERCEUSE SENSITIVE (fig. 120).

Cette machine, utilisée pour des pièces de petites dimensions, permet des perçages de 12 *mm* au maximum.

La broche est liée directement au moteur par courroie et poulies, dont la permutation permet de doubler le nombre des vitesses de rotation du foret.

La descente de la broche est donnée à la main. Ainsi l'opérateur *sent* (d'où le nom de sensitive) la résistance opposée par l'avance et peut la doser pour éviter la rupture du foret.

(1) L'extrémité active du foret a parfois perdu sa dureté sur plusieurs millimètres de longueur, ce qui oblige à un affûtage très long et entraîne une perte partielle de l'outil.

Les pièces peuvent être tenues à la main ou serrées dans de petits étaux posés simplement sur la table.

La tête ou la table peuvent glisser sur la colonne pour assurer le réglage d'approche de l'outil en fonction de l'épaisseur de la pièce à percer.

II. — PERCEUSE A COLONNE (fig. 121).

Elle est plus puissante que la précédente et de capacité supérieure, le diamètre de perçage pouvant atteindre 60 *mm*. Entre la broche et le moteur est intercalé un harnais ou une boîte de vitesses.

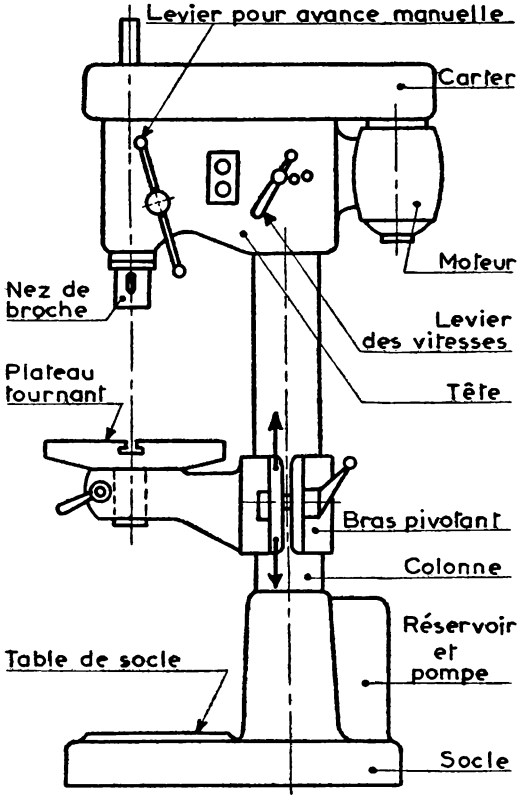


Fig.121- Perceuse à colonne.

La descente de la broche peut être manuelle et démultipliée ou automatique avec inter-position d'une boîte des avances.

Parfois, le plateau support de pièce peut tourner sur lui-même autour de son axe et autour de la colonne, ce qui facilite le positionnement des pièces bridées en rapport au foret. Le mouvement de monte et baisse du bras porte-plateau est commandé par pignon et crémaillère ou par vis et écrou.

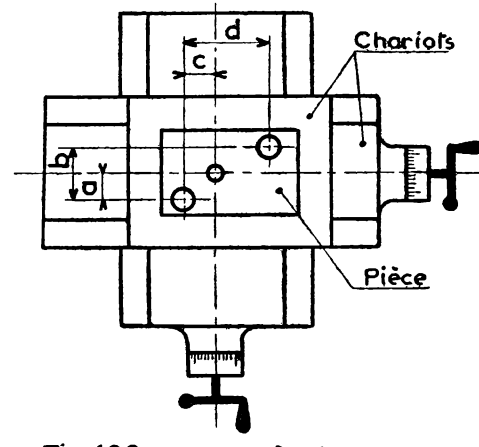


Fig.122- Chariots à déplacements orthogonaux.

Le socle de la machine peut former table pour servir de surface d'appui aux pièces hautes.

Pour obtenir avec précision le positionnement relatif de plusieurs trous, on monte sur le plateau des chariots croisés (fig. 122) dont les déplacements orthogonaux sont contrôlés soit par verniers, soit par butées et cales.

III. — PERCEUSE RADIALE (fig. 123).

La perceuse radiale a été conçue pour permettre le centrage du foret en rapport à la pièce fixe lorsqu'elle est lourde ou très encombrante. A cet effet, la broche est portée par un chariot

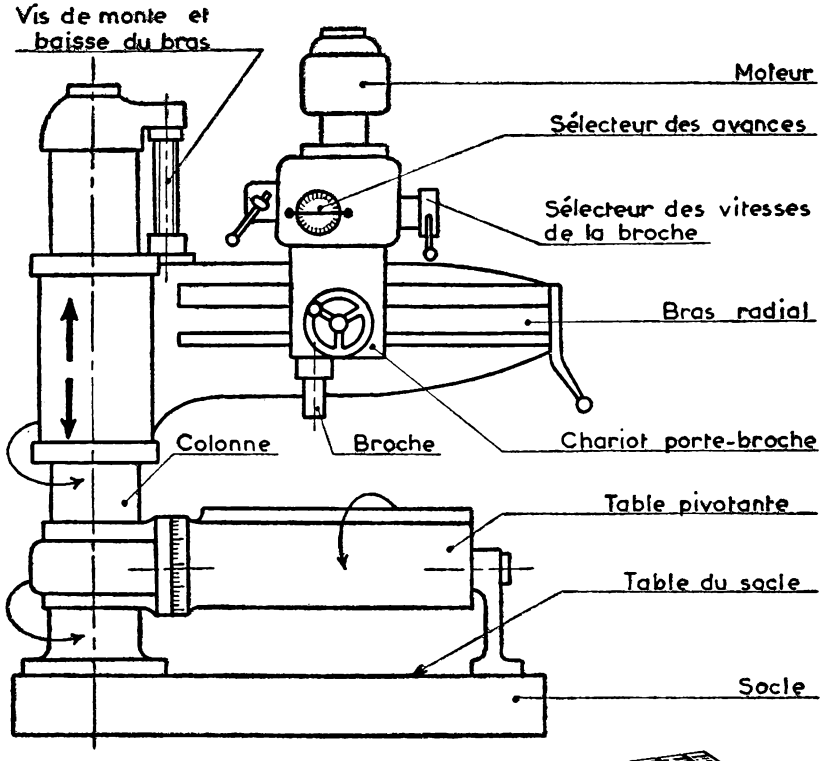


Fig. 123 - Perceuse radiale

qui peut se déplacer sur un bras radial, celui-ci pouvant tourner autour de la colonne qui le porte. Le mouvement de monte et baisse du bras est mécanique, le déplacement du chariot sur le bras est manuel. Le chariot porte-broche forme carter et contient une boîte des vitesses de rotation de la broche et une boîte des avances.

Le socle est dressé et rainé en **T**. Une table secondaire, rainée en **T** elle aussi, peut tourner à la fois autour de la colonne et autour d'un axe horizontal, ce qui facilite le perçage sur des faces inclinées en rapport au plan de base de la pièce.

Sur la table-socle peuvent se monter des accessoires tels que celui représenté par la figure 124.

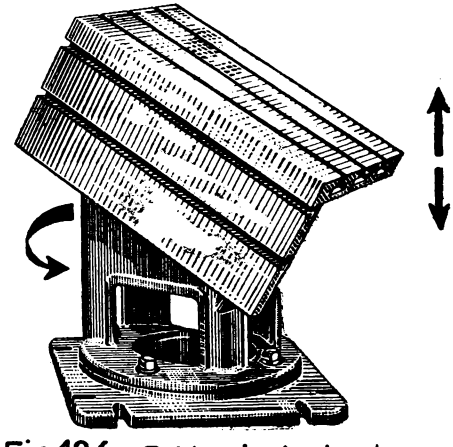


Fig. 124 - Table pivotante et inclinable.

La broche à commande manuelle ou automatique peut recevoir des forets allant jusqu'à 100 *mm*.

Les perceuses radiales sont très précises et remplacent souvent les aléseuses verticales.

IV. — PERCEUSES A BROCHES MULTIPLES

A. PERCEUSE A BROCHES EN LIGNE

Lorsqu'une pièce, fabriquée en série, nécessite des perçages de plusieurs diamètres différents, voire des chambrages, des lamages, des taraudages, on utilise des machines à **broches en ligne** (fig. 125) chacune portant son outil particulier. La descente de la broche est généralement manuelle mais il existe des machines à descente automatique. Certains modèles présentent jusqu'à huit broches en ligne.

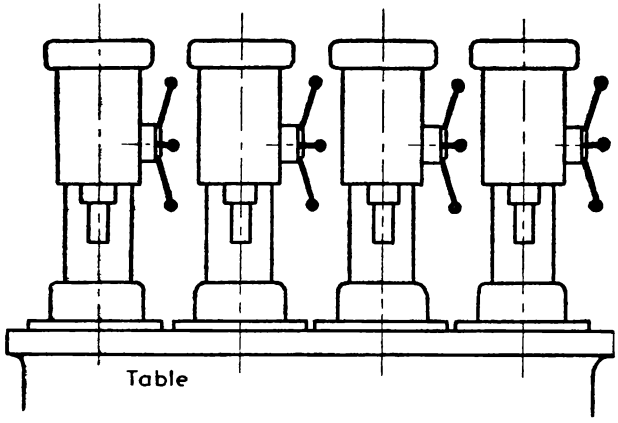


Fig.125– Perceuse à 4 broches en ligne.

Deux modes de travail peuvent être envisagés :

— le même opérateur présente successivement la pièce en regard de chaque broche ;

— un opérateur est assigné à chaque broche et la pièce passe d'un opérateur à un autre. Cette méthode n'est applicable que si le temps de travail pour chaque outil est sensiblement le même.

B. PERCEUSES A BROCHES A ENTRAXES VARIABLES

Si les pièces fabriquées en série présentent de nombreux trous (fig. 126), jusqu'à cinquante et même plus, on exécute le perçage sur des **perceuses à broches à entraxes variables.** Par réglage, on aligne les broches sur les trous à percer et leur perçage a lieu ensuite simultanément.

Les broches sont logées dans une tête formant carter (fig. 127) qui porte à la partie supérieure les roues et pignons de commande. Le positionnement latéral des broches est assuré par des bras porte-broche réglables placés sous le carter. La liaison des broches et des pignons est obtenue par des arbres à cardan. L'avance est réalisée par descente de l'ensemble qui glisse sur le bâti ou encore par descente de la broche principale de la machine lorsque la tête porte-broches est montée sur elle.

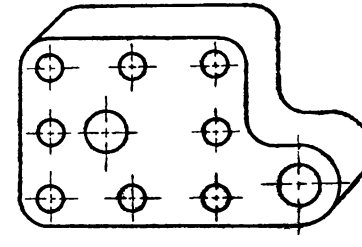


Fig.126 – Pièce à perçages multiples.

Les pièces sont logées dans un montage de perçage fixé sur la table et les outils sont de longueurs variables selon que la pièce présente des trous borgnes ou des épaisseurs différentes par exemple.

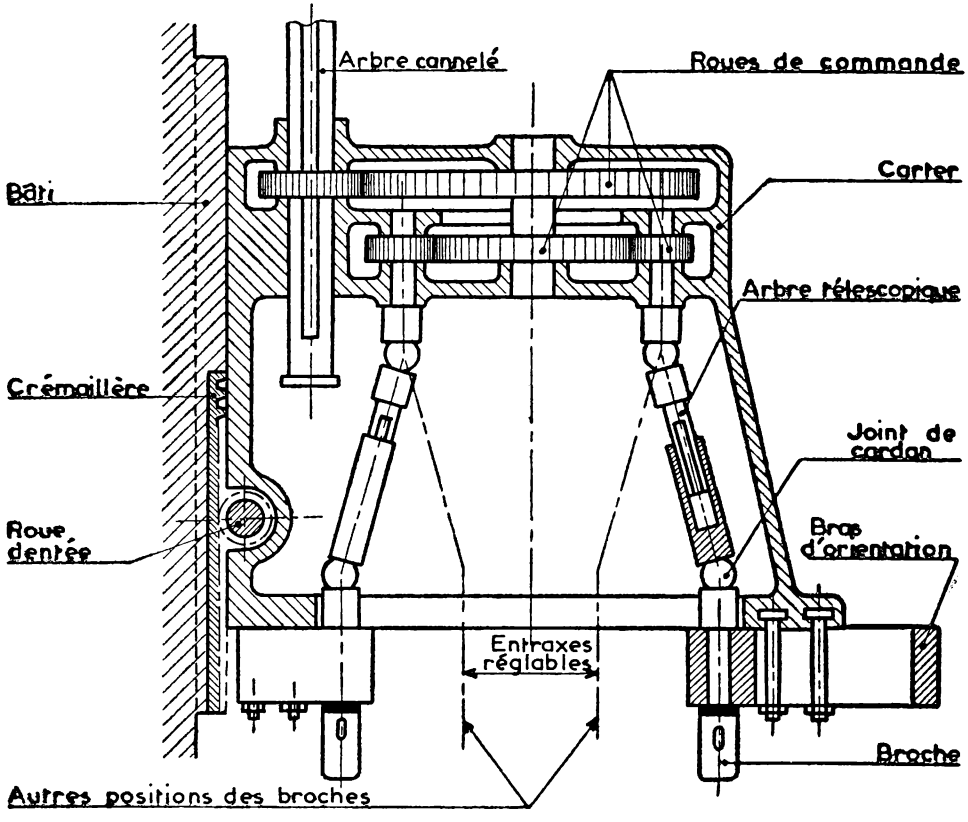


Fig:127- Schéma de réalisation et chaîne cinématique d'une tête de perceuse à broches à entraxes variables

V. — MACHINE A POINTER

Cette machine assure un positionnement des trous percés dans des tolérances très serrées: $\pm 4\mu$. C'est donc une machine de haute précision dont on ne peut utiliser efficacement les qualités que dans un atelier climatisé, c'est-à-dire où la température est constante.

Son allure générale rappelle celle d'une raboteuse à deux montants. La précision du déplacement des organes mobiles (table, chariot de traverse et chariot porte-outil) est due au contrôle direct assuré par règle étalons et système optique dont le dispositif O.P.L. étudié dans l'étude fonctionnelle des machines-outils (voir 1re partie, classe de 1re) est un exemple.

Les pièces, montées sur la table, sont généralement cotées en coordonnées rectangulaires d'après deux faces de référence (fig. 128).

On utilise, selon les travaux, des plateaux circulaires identiques à ceux utilisés sur fraiseuse. La division précise des pièces est obtenue par lecture à système optique.

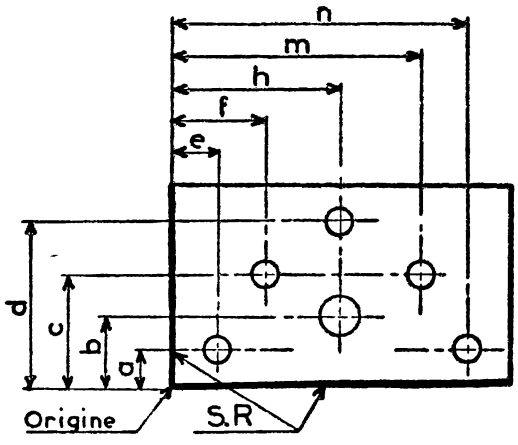


Fig:128- Cotation en coordonnées rectangulaires

On utilise surtout la machine à pointer pour la confection des pièces d'outillage (montage d'usinage, implantations de poinçons multiples pour outils à découper par exemple), de pièces prototypes ou encore de pièces de série de fabrication très précise.

TRAVAUX DE PERÇAGE

Les travaux de perçage relèvent des deux modes opératoires suivants :

— ou bien **l'outil est libre,** c'est-à-dire non maintenu latéralement;

— ou bien **l'outil est guidé,** c'est-à-dire maintenu par une bague, ou canon fixe, au voisinage de sa pointe.

I. — PERÇAGE A L'OUTIL LIBRE

Le respect du diamètre et de la rectitude de l'axe de perçage est lié aux deux conditions impératives suivantes :

1° **Affûtage correct :** les deux arêtes coupantes sont égales et également inclinées sur l'axe;

2° **Alignement de l'axe de l'outil avec l'axe du trou :** la pointe du foret est aligné sur le coup de pointeau amorçant le trou et matérialisant son axe.

A. CAUSES DE MAUVAIS PERÇAGE

1° **L'affûtage est incorrect.** Il en est ainsi, dans des proportions variables, lorsque l'affûtage est pratiqué à la main. Les arêtes sont inégales et inégalement inclinées sur l'axe (fig. 129-1). Le trou est trop grand et se resserre à la sortie.

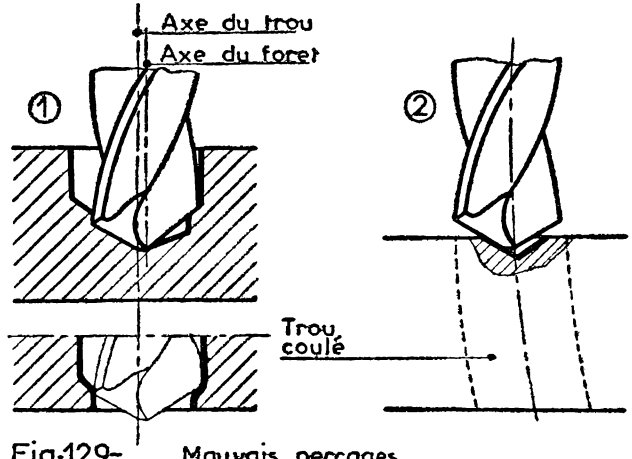


Fig:129- Mauvais perçages

① Foret mal affûté : le diamètre du trou est plus gros que celui du foret, sauf à la sortie

② Foret bien affûté mais mal aligné sur le coup de pointeau; le trou est dévié

2° Le foret est mal aligné sur l'axe du trou. Dans ce cas (fig. 129-2) le foret fléchit, son axe s'incurve et conserve cette direction pendant le perçage. : le trou est dévié, on dit qu'il est coulé.

3° L'attaque ou la sortie du foret ne se font pas sur des plans normaux à son axe. Au début du perçage, une seule arête est au contact du métal. Le foret fléchit donc suivant f_1 (fig. 130-1) et, comme dans le cas précédent, le trou est coulé. A la sortie, l'outil est repoussé suivant f_2. Une flexion trop importante dans un sens ou dans l'autre peut provoquer la rupture du foret.

Il faut donc, lors de l'étude de la forme de la pièce (fig. 130-2 et 3), prévoir des surfaces d'attaque normales à l'axe du trou, bossages ou évidements.

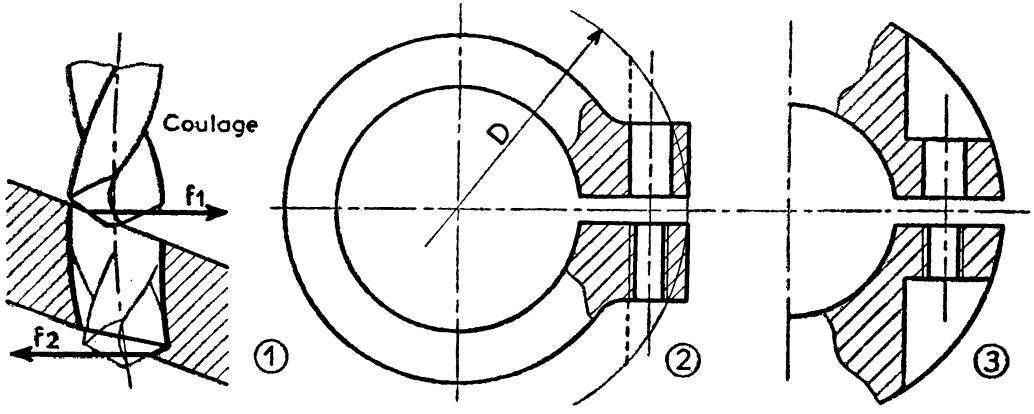


Fig.130- Modifications de forme pour assurer un perçage correct.
① L'attaque et la sortie du foret sur des faces inclinées le font dévier. Ces inconvénients peuvent être évités soit :
② Par des bossages normaux à l'axe
③ Par des fraisages

B. PRÉCAUTIONS EN VUE D'UN PERÇAGE CORRECT

1° Surveiller le début du perçage. C'est au début du perçage, et tant que la pointe du foret n'est pas entièrement engagée, que le foret a le plus tendance à dévier. Pour cette raison, il faut réduire l'avance pendant ce pointage, surtout si le foret est de petit diamètre, afin d'éviter sa flexion.

Pour cette même raison, il est bon de commencer le perçage avec un foret à centrer qui, plus court et taillé sur une faible longueur, est parfaitement rigide.

2° Diminuer la longueur de l'arête de pointe. Pour diminuer l'effort d'avancement il faut diminuer la longueur de l'arête de pointe par meulage de l'âme du foret. Cette opération, délicate, doit être exécutée à l'aide d'une meule profilée (fig. 131).

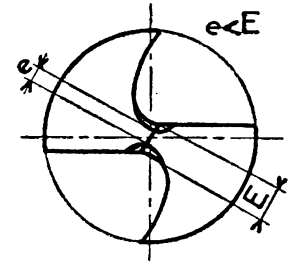


Fig.131-Diminution de l'arête de pointe

3° Percer un avant-trou. Lorsque le diamètre du trou devient important ($\mathbf{D} \geqslant 12\ mm$) il est nécessaire, pour plus de précision du diamètre du trou, de percer un avant-trou.

Le diamètre **d** de l'avant-trou à percer est donné par la relation empirique $\mathbf{d} \simeq \frac{\mathbf{D}}{4}$. Le foret de diamètre **D**, plus rigide, s'il travaille avec une avance réduite, corrige la déviation éventuelle de l'avant-trou parce qu'il n'est plus soumis qu'à un effort axial relativement faible.

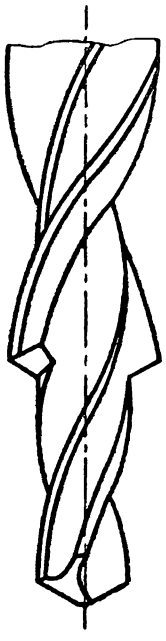


Fig. 132 - Foret étagé à coupes multiples.

Dans le cas de travaux en série, pour gagner du temps, on utilise des forets étagés (fig. 132). Ces outils peuvent aussi, leurs diamètres étant prévus en conséquence, servir à percer et à chambrer. Le chambrage peut être à fond plat ou à fond conique.

II. — PERÇAGE A L'OUTIL GUIDÉ

On impose l'alignement de l'axe du foret avec celui du trou à percer en guidant le foret par un **canon de perçage** en acier trempé dont le diamètre intérieur est égal à celui de l'outil (fig. 133). La pièce est logée dans un montage d'usinage où elle occupe une position précise en rapport aux canons de perçage.

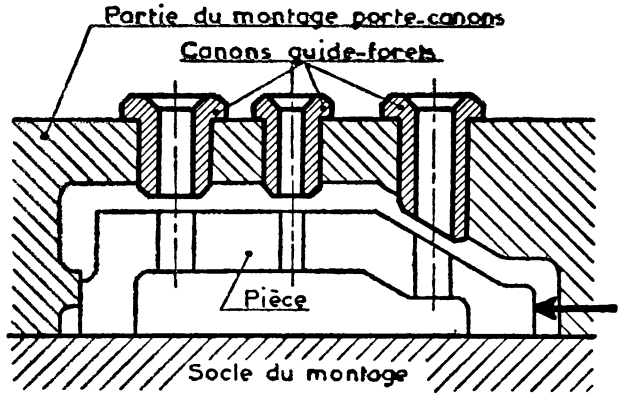


Fig. 133 - Principe du perçage à l'outil guidé.

L'outil étant guidé, il peut attaquer une surface non perpendiculaire à son axe sans subir de déviation. On atteint donc ainsi, en plus de la rectitude de leur axe, un positionnement précis des trous.

Remarque. — Au cours d'un chapitre spécial, nous étudierons plus complètement les montages d'usinage.

III. — PERÇAGE DE TROUS PRISMATIQUES

Quoique cette opération ne soit pas courante, elle peut rendre des services appréciables surtout si les trous à usiner sont borgnes et en petite série.

A. CONSTRUCTION D'UN FORET POUR TROU CARRÉ

Soit à exécuter le trou carré **abcd** dont $\overline{\mathbf{ef}}$ est une médiane (fig. 134).

— De **e** comme centre tracer l'arc $\overset{\frown}{\mathbf{mfn}}$; $\overline{\mathbf{mn}}$ est un côté du triangle équiangle **mne** ;

— de **m** et **n** comme centres, tracer les arcs $\overset{\frown}{ne}$ et $\overset{\frown}{mn}$. On obtient le triangle curviligne **mne** qui est la section du foret.

Le point **o**, intersection des médianes du triangle équiangle, est le centre du foret. Au cours du perçage, son centre **o** décrit un mouvement planétaire autour du centre géométrique o_1 du carré.

L'outil (fig. 134) a trois arêtes coupantes normales à son axe et leurs extrémités extérieures correspondent aux points **m**, **n**, **e**.

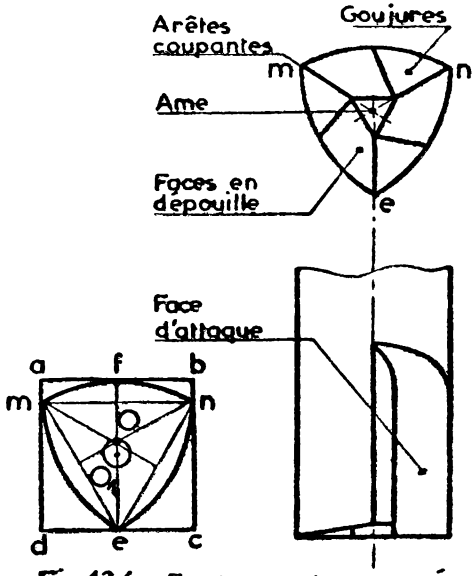


Fig.134- Foret pour trou carré et son tracé.

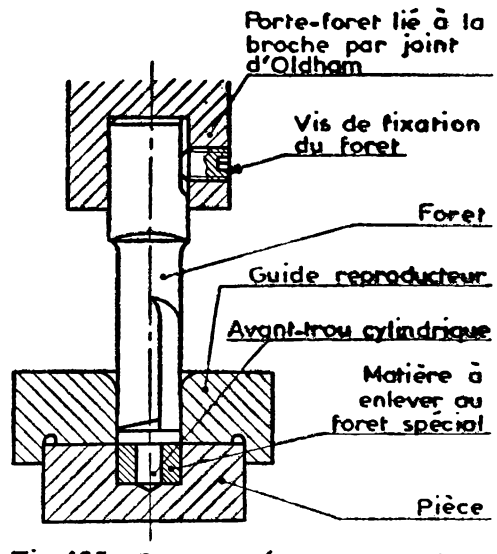


Fig.135- Perçage d'un trou carré

B. UTILISATION DU FORET (fig. 135)

Deux accessoires et une opération d'ébauche sont nécessaires :

— un porte-outil spécial qui autorise le mouvement planétaire de l'outil ; à cet effet, un joint d'Oldham est intercalé entre le fond du corps porte-outil et la douille porte-foret ;

— un guide foret portant une lumière carrée identique au trou à percer : c'est un guide reproducteur ;

— l'opération d'ébauche est un avant-trou cylindrique d'un diamètre légèrement supérieur à l'épaisseur de l'âme du foret.

LES TRAVAUX D'ALÉSAGE

GÉNÉRALITÉS

Les trous obtenus par perçage sont souvent trop imprécis en diamètre, en rectitude d'axe et en position pour assurer des assemblages dont les conditions de fonctionnement sont sévères. Il faut donc ajouter à l'opération d'ébauche par perçage une opération qui rectifie la première surface : **c'est l'alésage.**

D'une manière générale l'opération d'alésage s'effectue en trois temps :

1° **l'ébauche** qui corrige la rectitude et le positionnement du trou préalablement percé ou parfois brut de fondefie ou de forge.

2° **la demi-finition** qui conduit définitivement à une rectitude et à un positionnement du trou géométriquement corrects.

3° **la finition** qui conduit définitivement au diamètre et à l'état de surface désirés.

LES OUTILS D'ALÉSAGE

Ce sont soit des outils de forme, soit des outils d'enveloppe.

I. — OUTILS DE FORME

On distingue les alésoirs et les broches.

A. ALÉSOIRS A DIMENSION FIXE

Ils sont dérivés du foret mais, comme leur action se limite à une faible largeur périphérique, la taille des goujures, droites ou hélicoïdales, est moins profonde, ce qui laisse une grande rigidité à l'outil. La taille hélicoïdale est préférable car elle assure un meilleur guidage.

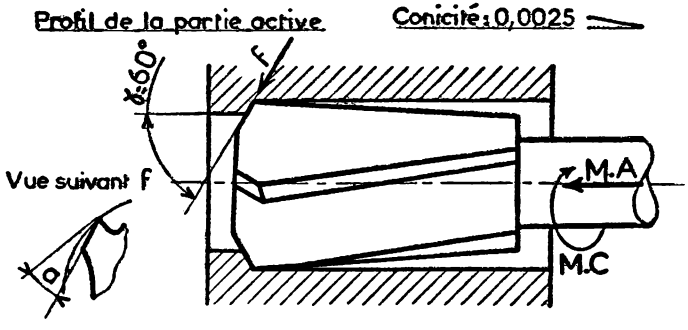


Fig. 136 - Alésoir ébaucheur.

1° Alésoir d'ébauche (fig. 136).

C'est l'alésoir utilisé immédiatement après le perçage ou pour les trous bruts de fonderie. Il comporte 3 ou 4 arêtes coupantes situées en bout et inclinées sur l'axe pour former le cône d'action de l'outil. L'angle d'obliquité $\bar{\gamma}$ vaut environ 60°. La partie guide, non coupante et, par suite sans dépouille a une conicité vers l'arrière de 0,025 % pour éviter son frottement sur la surface usinée.

2° **Alésoir de demi-finition** (fig. 137).

Le nombre des cannelures est plus élevé que pour le précédent afin de répartir le métal à enlever sur un nombre d'arêtes coupantes plus grand et d'améliorer le guidage. L'alésoir coupe en bout mais l'obliquité du profil diminue : $\gamma = 45°$ et la conicité vers l'arrière est de 0,025 %.

La précision du travail, positionnement et rectitude du trou, est fonction de la rigidité de l'outil et de son support ainsi que de la coaxialité de la broche de la machine et du trou au cours de l'avance et de la rotation de l'outil.

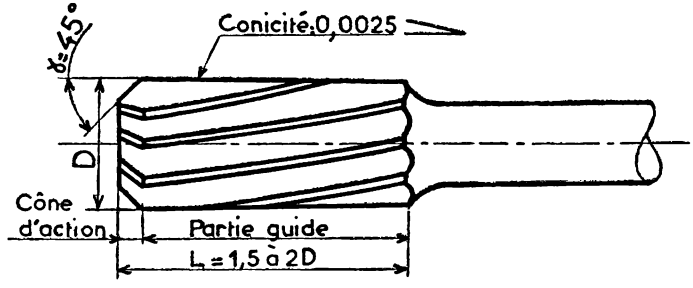


Fig.137- Alésoir monobloc de demi-finition.

3° **Alésoir de finition** (fig. 138).

Pour éviter tout broutement de l'outil, le nombre des cannelures est encore plus grand que pour l'alésoir de demi-finition, il est de 9 à 12.

Pour assurer le respect de la cote et un très bon état de surface, la partie taillée présente le profil particulier suivant :

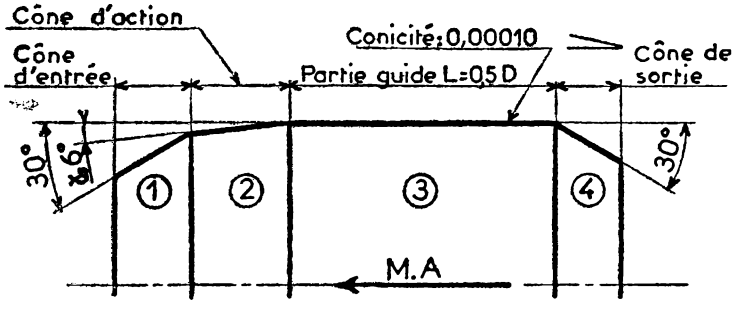


Fig.138- Profil d'une lame d'alésoir de finition.

— **un cône d'entrée,** dont les dents sont sans dépouille, destiné à centrer l'outil sans détériorer l'entrée du trou;

— **un cône d'action** de faible inclinaison : $\gamma = 6°$ car l'épaisseur de métal à enlever est très réduite. La dépouille des dents va de 2° pour les métaux durs à 5° pour les métaux légers;

— **un guide** aux dents sans dépouille qui maintient l'alignement de l'outil au cours de son avance. La conicité très faible, de 0,01 % vers l'arrière, du guide ne nuit pas au bon guidage de l'outil et l'empêche de serrer pendant son enfoncement;

— **un cône de sortie** sans dépouille pour éviter les rayures qui se produirait sur la surface usinée lors du retrait de l'outil.

L'alésoir de finition doit avoir une grande finesse d'arête pour accepter un copeau minimum extrêmement mince. Il permet alors d'atteindre la qualité 6.

Les alésoirs de diamètre supérieur à 20 *mm*, qu'ils soient d'ébauche ou de finition sont creux et

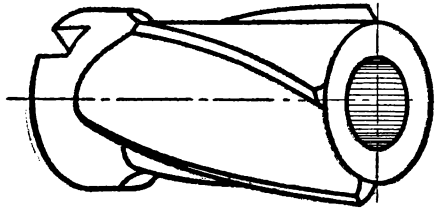


Fig.139- Alésoir creux pour ébauche.

s'appellent **manchons-aléseurs** (fig. 139). Ils se montent sur un arbre cylindrique ou conique selon leur alésage. Leur entraînement est assuré d'une manière positive par des ergots clavettes.

GUIDAGE DES ALÉSOIRS D'ÉBAUCHE

L'ébauche de l'alésage, obtenu par perçage ou par fonderie, et surtout dans ce dernier cas, ne peut être alignée que très imparfaitement sur l'alésoir. Il s'ensuit que, l'épaisseur de métal coupé étant variable, l'alésoir sera de plus en plus désaxé. L'alésoir de demi-finition ne pouvant compenser cette incorrection, il est nécessaire de guider l'alésoir d'ébauche.

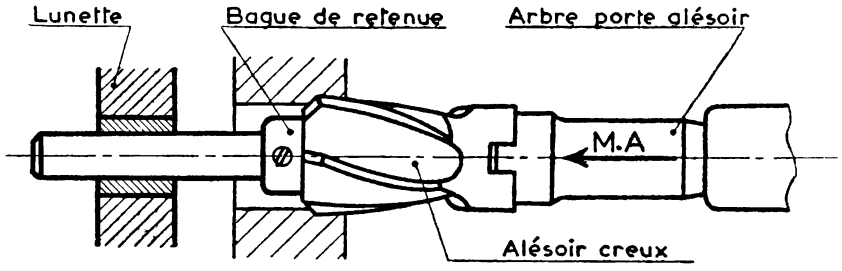


Fig:140- Alésoir guidé par l'avant.

Si l'alésage de la pièce débouche à l'extérieur (fig. 140) on peut guider l'alésoir par l'avant à l'aide d'une lunette fixée à la table ou au montage d'usinage.

Si l'alésage ne traverse pas complètement la pièce (fig. 141), l'alésoir peut être guidé par l'arrière. Dans ce cas, la douille de guidage est amovible et son diamètre extérieur **D** est supérieur à celui de l'alésage **d** pour permettre le passage de l'outil.

Les alésoirs de demi-finition peuvent être guidés directement. Ils passent alors dans des canons identiques aux canons de perçage.

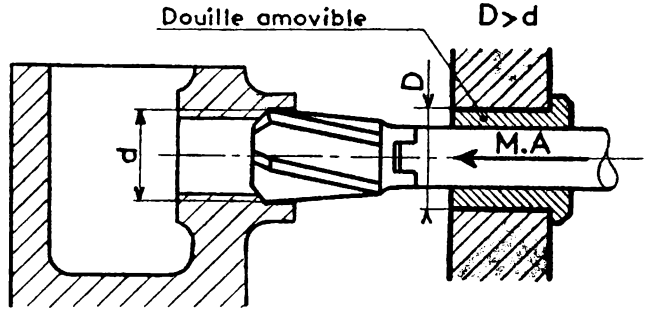


Fig:141- Alésoir guidé par l'arrière.

B. FORET ALÉSEUR

Cet outil rappelle le foret hélicoïdal (fig. 142) mais il est plus rigide car, ne coupant pas dans sa partie centrale, il a une âme plus épaisse. Il est à trois ou quatre arêtes tranchantes. On l'emploie fréquemment comme finisseur après perçage au foret guidé pour des travaux de qualité 8 à 11, mais il peut être utilisé aussi comme ébaucheur.

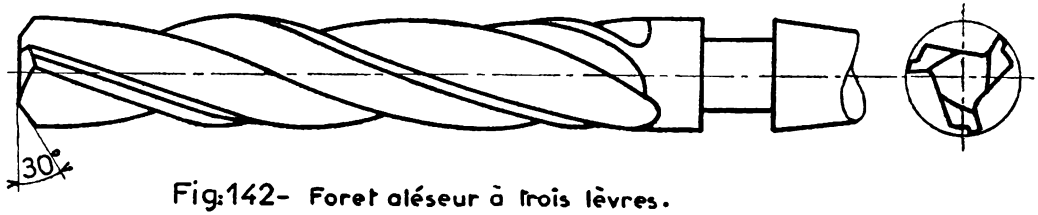


Fig:142- Foret aléseur à trois lèvres.

C. ALÉSOIRS EXPANSIBLES

Pour compenser la diminution de diamètre des alésoirs à dimension fixe par suite de l'affûtage périphérique qui est nécessaire, ou pour augmenter le diamètre de l'alésoir dans des cas particuliers, on a construit des alésoirs expansibles réglables.

1° Alésoir expansible en bout (fig. 143).

C'est un alésoir monobloc. La partie taillée est fendue suivant trois ou quatre génératrices. Le gonflement du diamètre est obtenu par une vis de règlage à faible conicité. La variation du diamètre est de l'ordre de 0,2 *mm*.

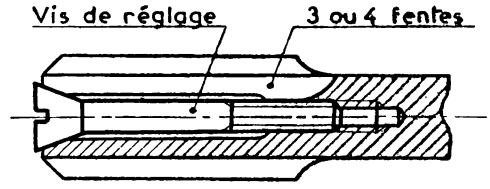


Fig:143- Alésoir expansible en bout.

2° Alésoir expansible à lames (fig. 144).

Les lames sont logées dans des rainures inclinées. Un écrou de réglage les déplace axialement pour modifier le diamètre de l'outil et des coins de blocage pressés par des vis, les maintiennent en position.

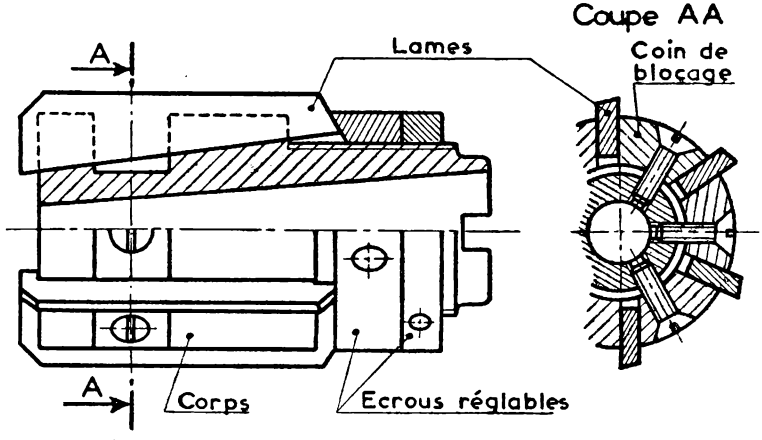


Fig:144- Alésoir expansible à lames.

Leurs dimensions étant faibles, les lames peuvent être en carbure métallique. Elles donnent ainsi des alésages précis et un bel état de surface et leur durée de coupe est très grande.

Les alésoirs expansibles à lames peuvent supporter un grand nombre d'affûtages.

D. CONDITIONS DE COUPE DES ALÉSOIRS

a) Réserves d'alésage. Pour que l'alésage obtenu soit correct, il faut laisser des réserves d'usinage d'épaisseur décroissante au fur et à mesure que l'on se rapproche de la cote finale (fig. 145).

Pour l'ébauche, le diamètre de la réserve peut atteindre plusieurs millimètres, surtout pour les trous bruts de forge ou de fonderie. L'alésoir d'ébauche laisse un trou environ de 0,5 à 1 *mm* plus petit que la cote finale. Cette réserve est enlevée en grande partie par l'alésoir de demi-finition qui laisse un trou

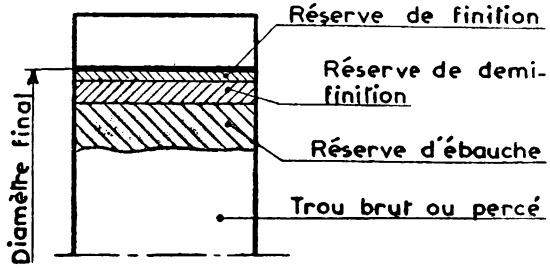


Fig:145- Réserves d'alésage.

de diamètre 0,2 à 0,3 *mm* plus petit que le diamètre définitif. Cette dernière réserve est enfin enlevée par l'alésoir de finition.

b) Avance par tour. L'usure de l'outil en diamètre étant pratiquement proportionnelle au nombre de tours qu'il fait, on a intérêt à prendre une grande avance pour réduire le nombre de tours. Il faut cependant éviter les rayures dues à une pénétration trop rapide, sans descendre au-dessous du copeau minimum que l'on peut admettre égale à 0,05 *mm* pour un alésoir parfaitement affûté.

L'avance par tour, fonction du nombre de dents et de l'avance par dent, sera d'autant plus grande que le diamètre de l'alésoir sera plus grand. Il y a en effet plus de dents sur un gros alésoir que sur un petit.

c) Vitesse de coupe. La vitesse de coupe d'un alésoir est comparativement plus faible que celle d'un outil de tour par exemple. Le tableau n° 2 indique des valeurs moyennes pour les métaux usuels et pour un alésoir en acier rapide supérieur.

Matière usinée	Vitesse de coupe en m/mn	Avance par tour en mm			Lubrifiant
		Diamètre de l'alésoir en mm			
		$\varnothing < 20$	$20 < \varnothing < 50$	$\varnothing > 50$	
Acier au corbone					
(Rr)e < 60 kg/mm² ...	10 à 15	0,2 à 0,4	0,4 à 0,6	0,6 à 1	Huile de colza
(Rr)e < 90 kg/mm² ...	6 à 10				
Acier allié recuit	8 à 12	0,1 à 0,3	0,3 à 0,5	0,5 à 0,8	Huile soluble
Acier moulé	6 à 12	0,1 à 0,3	0,3 à 0,5	0,5 à 0,8	Huile soluble
Fonte douce	10 à 16	0,3 à 0,8	0,8 à 1,5	1,5 à 2	A sec ou huile soluble
Bronze.....	6 à 12	0,2 à 0,4	0,4 à 0,6	0,6 à 1	A sec ou huile de colza
Alliages légers.....	20 à 40	0,3 à 0,5	0,5 à 1	1 à 2	Pétrole

Tableau n° 2. — Vitesse de coupe et avance pour alésoirs en acier rapide (Documentation R. Besnard).

E. BROCHES

Les broches pour alésage ont les mêmes caractéristiques générales que celles étudiées précédemment. Souvent, pour les métaux élastiques, elles présentent, après la partie finition, une partie dite **brunissoir** constituée par des surfaces toriques dont le profil est en forme d'olives

(fig. 146). Les olives ont un diamètre légèrement supérieur à celui des dents finisseuses mais, après leur passage, la surface de l'alésage, devenue parfaitement lisse et durcie, reprend son diamètre normal par élasticité.

La section circulaire étant facile à réaliser, les broches pour alésage sont d'une construction et d'un entretien relativement peu coûteux.

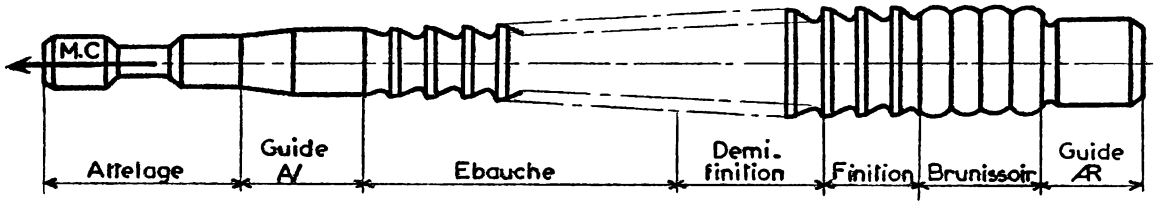


Fig:146- Broche d'alésage avec brunissoir en olives.

Lorsque l'ébauche circulaire est obtenue par matriçage ou estampage, la réserve de brochage est plus importante que pour une ébauche percée. D'autre part, la surface brute rend difficile le centrage correct de la broche. On est donc conduit à constituer la partie d'ébauche par une suite de sections polygonales (fig. 147). Les dents attaquent ainsi plus facilement le métal et avec une progression plus forte. Leurs sommets sont décalés angulairement toutes les deux dents pour former le cercle d'ébauche complet. Les dents à section circulaire travaillent alors sur un métal sain et coupe une épaisseur régulière.

La figure 147 représente l'action successive des dents de la broche :

— $\mathbf{D}_1$: diamètre brut; $\mathbf{D}_2$: diamètre d'ébauche atteint par les dents polygonales; $\mathbf{D}_3$: diamètre atteint par les dents circulaires.

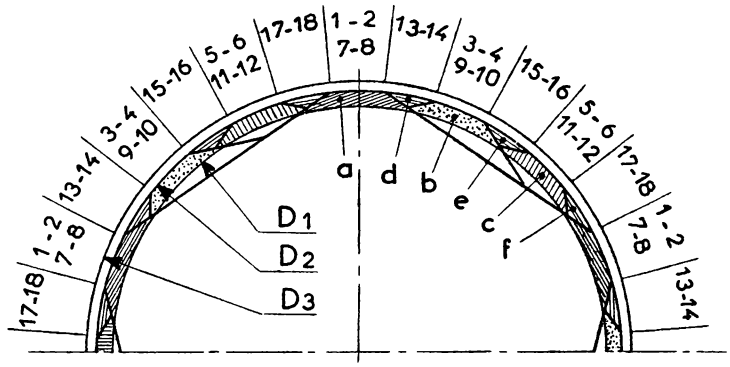


Fig:147- Progression d'une broche à dents d'ébauche polygonales.

— **a, b, c, d, e, f,** : parties enlevées successivement par les dents 1, 2, 3... 16, 17, 18, etc. pour le secteur du cercle d'ébauche.

Conditions de coupe des broches circulaires.

Elles sont identiques à celles qu'exige le brochage plan étudié précédemment.

II. — OUTILS D'ENVELOPPE

On distingue les outils de tour et les barres d'alésage.

A. OUTIL DE TOUR

L'outil d'enveloppe type, duquel sont dérivés tous les autres, est l'outil de tour pour tournage intérieur (fig. 148) ou **alésage.**

Mais, alors que pour l'alésage à l'alésoir, les efforts radiaux s'équilibrent, il n'en est plus de même pour l'outil de tour qui fléchit surtout sous l'action de la composante radiale **R** des efforts de coupe.

Pour réduire la flexion de l'outil il faut, au fur et à mesure que l'on se rapproche de la cote définitive, diminuer la profondeur de passe. L'on peut aussi, lorsqu'on est peut éloigné de la cote finale, et lorsque le diamètre du trou a suffisamment augmenté, substituer un deuxième outil au premier avec un corps plus gros, ce qui diminue encore la flexion.

L'alésage se fait dans des conditions acceptables quand le rapport de la longueur d'alésage au diamètre ne dépasse pas 2,5. La longueur $\mathbf{L_1}$ du porte-à-faux de l'outil sera donc limitée à l'obtention de la longueur **L** nécessaire.

On évite le forgeage de l'outil en utilisant un grain bloqué sur corps par vis ou clavette (fig. 149).

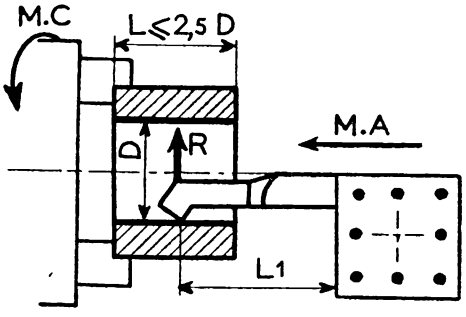


Fig:148- Alésage au tour.

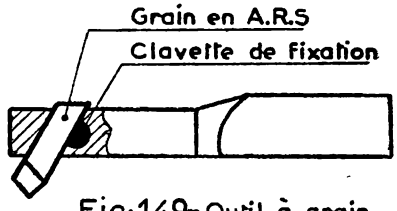


Fig:149- Outil à grain.

B. BARRE D'ALÉSAGE

L'outil en porte-à-faux se comporte comme une pièce encastrée à une extrémité (fig. 150) et la flèche **f** qu'il prend sous l'action radiale **R** est donnée par la relation $\mathbf{f = \frac{1}{3} \times \frac{RL^3}{EI}}$ (pour un corps cylindrique $\mathbf{I = \frac{\pi d^4}{64}}$). Lorsqu'on double la longueur du porte-à-faux, par exemple, la

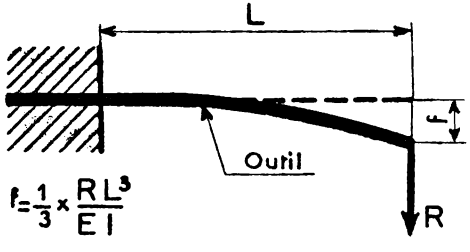


Fig:150- L'outil est encastré à une extrémité, l'autre extrémité est libre.

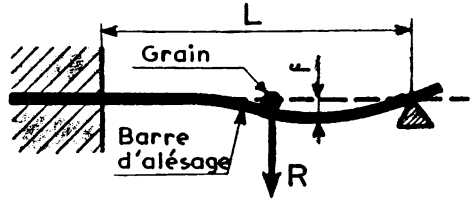


Fig:151- La barre d'alésage est encastrée à une extrémité, l'autre extrémité repose sur un appui.

flèche est multipliée par $2^3 = 8$. Comme le corps d'outil est limité en diamètre, on est conduit à lui donner un deuxième appui qui supprime le porte-à-faux et on obtient ainsi une **barre d'alésage.**

La barre d'alésage (fig. 151), encastrée à une extrémité et supportée à l'autre extrémité sans encastrement (guide court) subit une flèche dont la valeur est environ $\frac{1}{100} \times \frac{\mathbf{RL^3}}{\mathbf{EI}}$. Elle est donc environ 30 fois plus faible que celle de de l'outil en porte-à-faux travaillant dans les mêmes conditions.

En supposant que la barre d'alésage ne soit encastrée ni à l'une ni à l'autre des extrémités (deux guides courts, fig. 152) la flèche qu'elle subirait serait $\mathbf{f} = \frac{1}{48} \times \frac{\mathbf{RL^3}}{\mathbf{EI}}$, c'est-à-dire 16 fois plus faible que celle de l'outil en porte-à-faux.

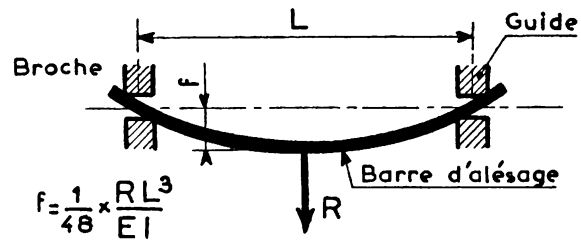


Fig:152– La barre d'alésage est posée sur deux appuis d'extrémités.

On peut donc dire que, **à flèche égale,** la barre d'alésage peut avoir une course de travail comprise entre $\mathbf{L_1}$ et $\mathbf{L_2}$ tels que $\frac{\mathbf{L^3}}{3} = \frac{\mathbf{L_1^3}}{48} = \frac{\mathbf{L_2^3}}{100}$, soit $\mathbf{L_1} \simeq 2{,}5\,\mathbf{L}$ et $\mathbf{L_2} \simeq 3{,}2\,\mathbf{L}$.

La barre d'alésage (fig. 153) porte un outil grain. Elle est en acier demi-dur ou dur, traitée et rectifiée, et montée directement dans la broche qui lui transmet le mouvement de coupe. L'autre extrémité est supportée par une lunette à coussinet en fonte, en bronze ou en acier traité. L'adhérence broche-barre est assurée par une clavette de sécurité.

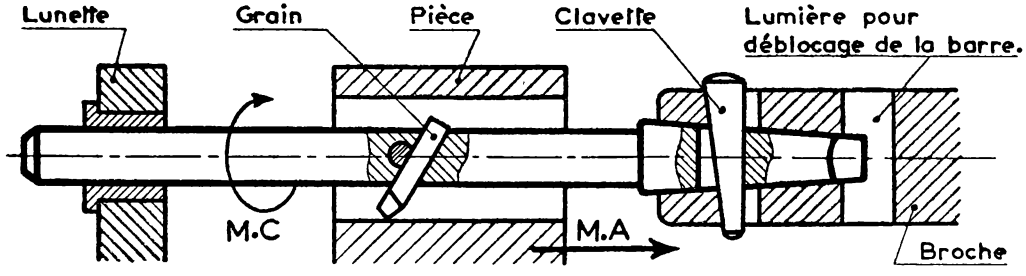


Fig:153– Barre d'alésage, ses supports et son entraînement par attelage rigide.

Efforts sur l'outil.

La barre reçoit par l'action sur le grain (fig. 154) :

— une poussée longitudinale $\mathbf{F}_a$ qui ne provoque pratiquement aucune déformation (couple de valeur $\mathbf{F}_a \times \frac{\mathbf{D}}{2}$ relativement faible);

— une poussée tangentielle $\mathbf{F}_c$ qui, reportée sur l'axe, se ramène à une poussée radiale $\mathbf{F}'_c$ et un couple de torsion $\mathbf{F}_c\mathbf{R}'_c$ dont l'effet est pratiquement nul;

— une poussée radiale $\mathbf{F}_p$.

En définitive, les deux poussées radiales $\mathbf{F}'_c$ et $\mathbf{F}_p$ se composent suivant $\mathbf{R}$ qui provoquent la flexion de la barre d'alésage et de la broche.

En général, l'ensemble broche et barre d'alésage, supposé rigidement lié, repose sur les deux paliers de la broche et sur la lunette qui sert de guide. Il y a donc trois appuis et un tel système est dit hyperstatique. L'étude (1) montrerait que les supports réagissent suivant $\mathbf{R}_1$ et $\mathbf{R}_2$ sur la broche et $\mathbf{R}_3$ sur la barre. La broche est montée sur des paliers de gros diamètre et de

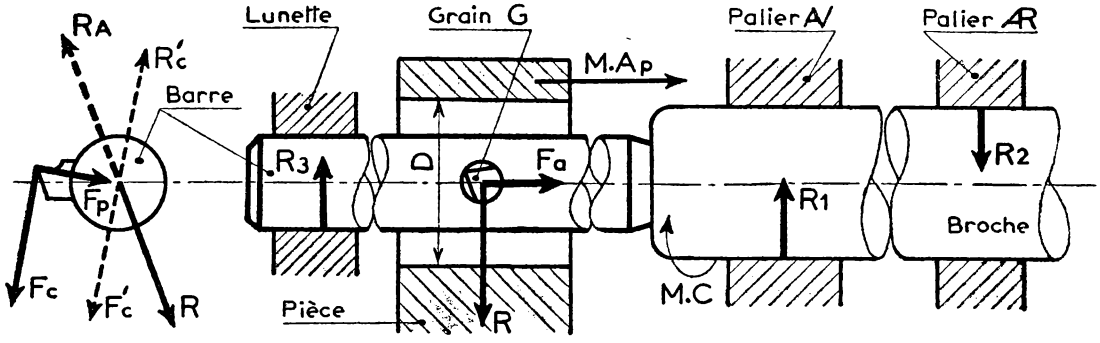


Fig:154- Efforts radiaux sur une barre d'alésage et sur ses supports.

grande portée et sa déformation est pratiquement nulle. La barre, dont le diamètre est limité par la dimension de l'alésage accuse une flèche très réduite au droit du grain. Quant à la lunette guide, la réaction $\mathbf{R}_3$ provoque son usure assez rapidement par frottement de rotation et de translation. Pour réduire cette usure, la lunette est parfois montée sur billes et la barre ne fait que glisser à la façon du fourreau de broche d'une perceuse.

Liaison du grain avec la barre et son réglage.

Une liaison efficace du grain est obtenue par clavette (fig. 155). L'outil qui est un petit barreau cylindrique, porte un méplat parallèle à son axe tandis que le méplat de la clavette est incliné. La clavette est en acier demi-dur traité.

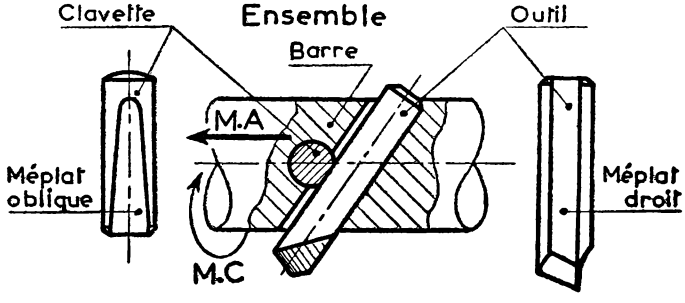


Fig:155- Détails du montage d'un grain par clavette.

(1) Cette étude n'entre pas dans le cadre du programme de la classe.

La liaison peut être obtenue aussi par vis de pression (fig. 156) à six pans creux s'appuyant sur le méplat du grain. La poussée du grain par vis rend son réglage plus facile que dans le montage par clavette. Le déplacement radial du grain $\mathbf{p} = \mathbf{l} \sin \alpha$.

Le réglage de la saillie du grain, qui conditionne le diamètre d'alésage, est mesuré par un micromètre, à monture spéciale avec semelle en vé qui s'appuie sur la barre (fig. 157). On a :

Rayon barre $\mathbf{R}_b$ + saillie $\mathbf{S}$ = rayon alésage $\mathbf{R}_a$. Il faut veiller, au cours du réglage à ce que le bec de l'outil et l'axe du micromètre soient alignés.

Pour les travaux unitaires on utilise avec profit l'outil Microbore (fig. 158) dont le réglage se fait par vis micrométrique et tambour gradué avec vernier. La précision du réglage est de l'ordre de 2μ.

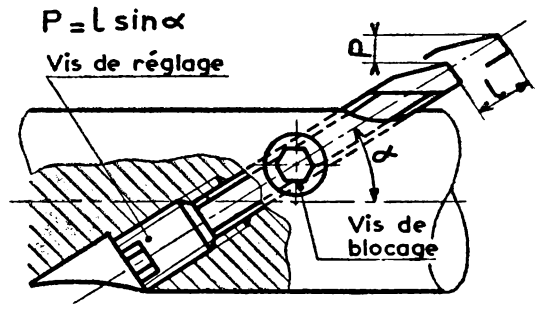


Fig:156- Grain bloqué et réglage par vis.

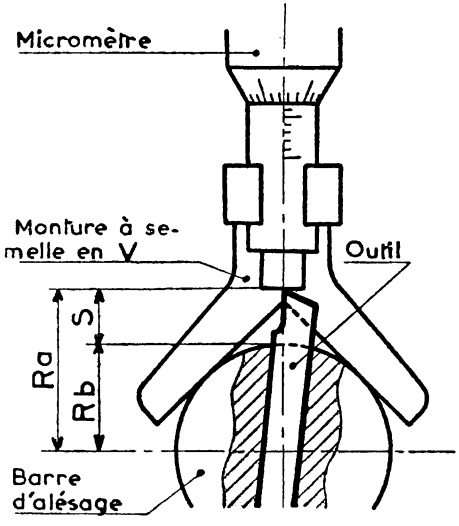


Fig:157- Réglage du grain au micromètre.

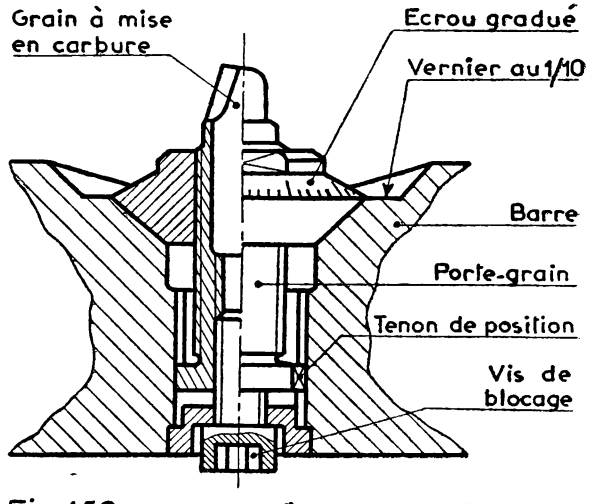


Fig:158- Porte-outil "MICROBORE"

Liaison de la barre avec la broche de la machine.

a. Montage rigide. La barre, à queue conique, est montée directement dans la broche (fig. 153 et 154). L'ensemble broche-barre forme un **attelage rigide** et il faut que la lunette soit bien alignée sur la broche.

Ce système de liaison est surtout utilisé pour des travaux unitaires ou de petite série car la pièce est alors montée directement sur la table de la machine.

b. Montage flottant. Pour les travaux de série, les pièces sont usinées en montage d'usinage qui porte deux paliers supports de barre.

L'alignement de ces deux paliers n'est obtenu qu'imparfaitement malgré les deux mouvements de réglage orthogonaux de la table et de la broche. On réalise donc un entraînement de la barre par un joint genre à Cardan qui peut tolérer un défaut d'alignement barre-broche (fig. 159). Un tel montage est dit **montage flottant.**

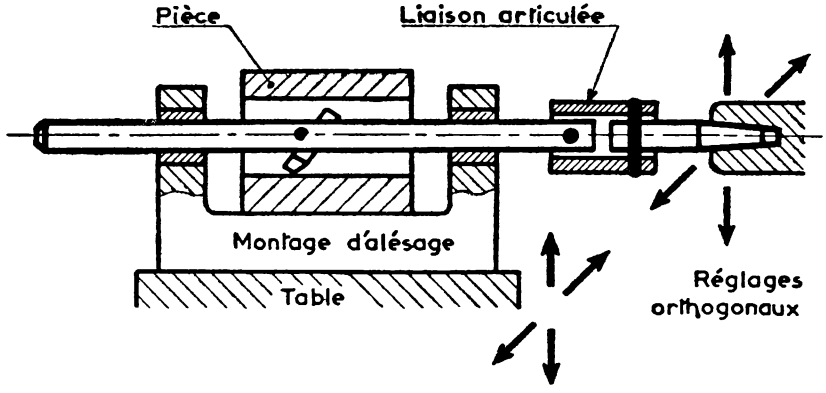


Fig.159- Montage flottant d'une barre d'alésage.

DÉFAUTS TYPES D'ALÉSAGE

I. — LA BARRE EST EN PORTE-A-FAUX

La barre en porte-à-faux est utilisée pour les alésages courts.

Lorsque la pièce a le mouvement d'avance **M.Ap** (fig. 160-A) le moment fléchissant de la barre **Mf** = **RL** est constant pour une même section de copeau. Donc que l'outil attaque en 1 ou qu'il débouche en 2, la déformation de la barre est invariable et l'alésage est cylindrique.

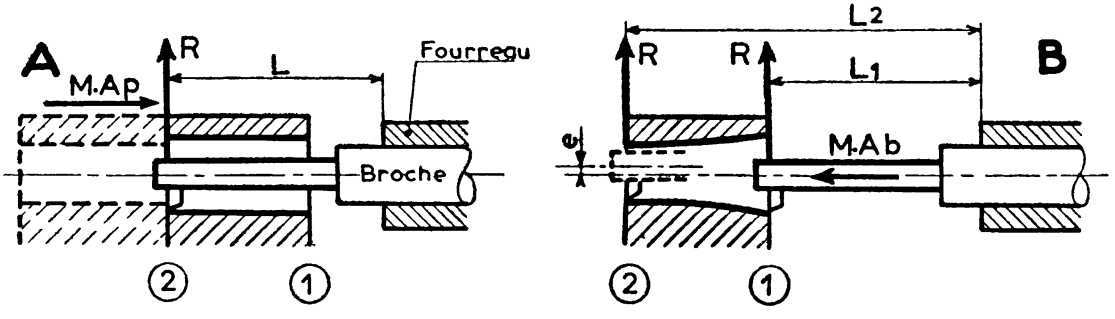


Fig.160- Alésage en porte à faux avec barre à un grain.
A : Par avance de la pièce, l'alésage est cylindrique.
B : Par avance de la barre, l'alésage n'est pas cylindrique.

Si au contraire c'est la barre qui avance suivant **M.Ab** (fig. 160-B), le moment fléchissant $\mathbf{RL_1}$ en 1 est plus petit que $\mathbf{RL_2}$ en 2. L'alésage est donc plus petit en 2 qu'en 1 car l'outil fléchit vers l'axe plus fortement à la sortie en 2 qu'à l'entrée en 1.

II. — LA BARRE EST SUPPORTÉE PAR UNE OU DEUX LUNETTES

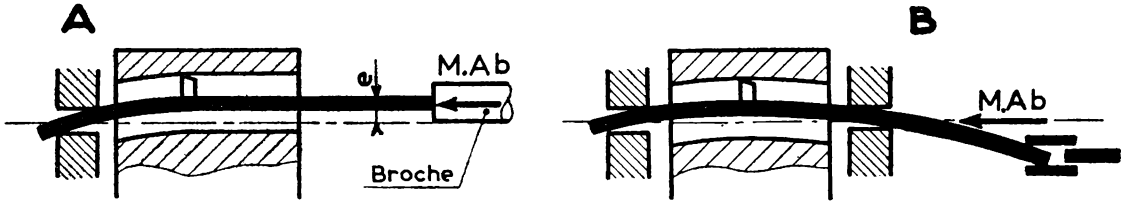


Fig:161- Défauts d'alésage avec lunette et avance de la barre.
A Attelage rigide et lunette mal alignée.
B Attelage flottant et barre déformée ou lunettes mal alignées.

Dans le cas d'un montage rigide (fig. 161-A), s'il y a défaut d'alignement de la lunette et avance de la barre, l'alésage n'est pas rectiligne.

Si le montage est flottant (fig. 161-B), un défaut d'alignement conduit, au cours de l'avance de la barre, à un alésage incurvé.

Enfin, malgré l'alignement barre-broche (fig. 162), par suite de sa flexion minimum en 1 et en 2 et maximum en 3, la barre donne un alésage *en sablier*.

Dans les trois cas précédents, si la pièce reçoit le mouvement d'avance, l'alésage obtenu est cylindrique parce que la flèche ou l'excentration restent constantes. Cependant, dans l'exemple de la figure 163, où la lunette est

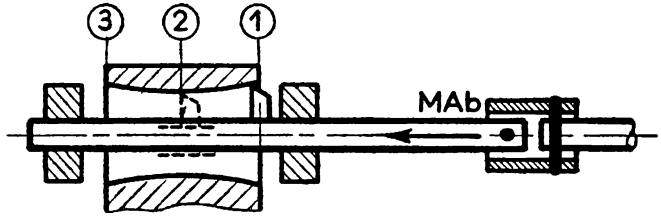


Fig:162- Alésage en "sablier" par avance de la barre.

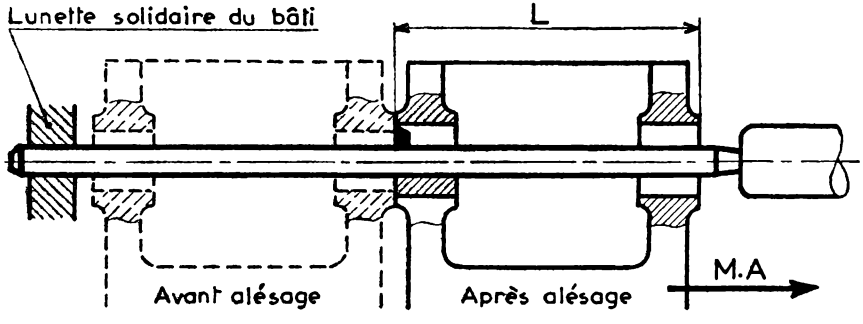


Fig:163- La lunette est solidaire du bâti et la pièce avance, la barre a une grande longueur.

solidaire du bâti de la machine, la longueur de la barre est très grande et sa flexion peut varier en raison du manque de régularité de l'épaisseur du copeau ou d'homogénéité du métal à façonner.

On peut encore combattre les défauts de flexion de la barre en montant deux grains diamétralement opposés (fig. 164) qui coupent une même section de copeau. Les deux forces **R** reportées sur l'axe s'équilibrent. Ce moyen est réservé pour l'ébauche et pour la demi-finition.

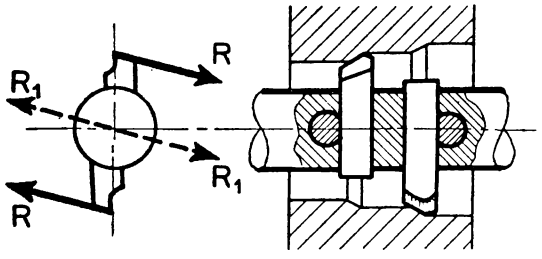


Fig:164- Barre à 2 outils opposés, les forces R s'équilibrent.

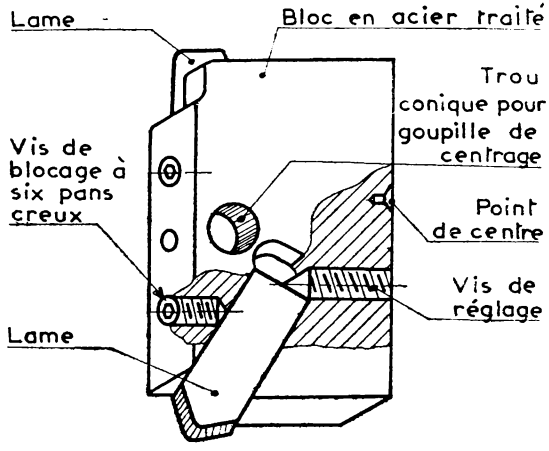


Fig:165- Bloc d'alésage à outils réglables.

La figure 165 montre un bloc à deux outils directement opposés, utilisé surtout pour la finition. Les outils, à mise en carbure métallique, sont encastrés dans des rainures en queue d'aronde, leur réglage et leur fixation sont assurés par vis. Le bloc porte deux points de centre qui permettent son affûtage sans montage spécial. Une goupille conique centre le bloc en même temps qu'elle l'appuie dans la lumière de la barre ou encore elle peut lui laisser une certaine liberté radiale afin qu'il se centre lui-même dans l'alésage.

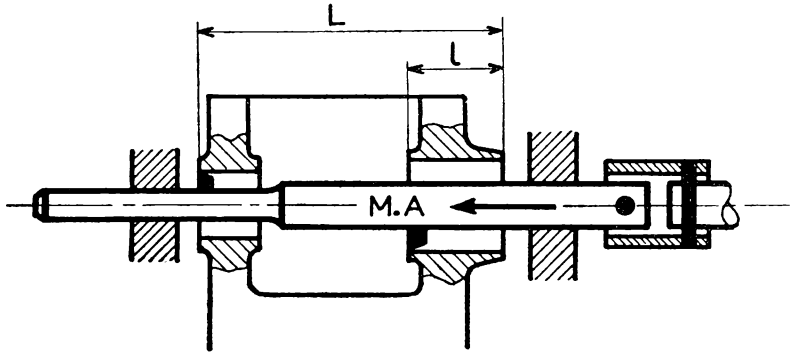


Fig:166- La barre porte deux outils, le montage porte les lunettes, la longueur d'avancement l est réduite.

Lorsque l'usinage le permet, on peut construire une barre d'alésage de diamètres différents, dite **barre épaulée,** ce qui augmente sa rigidité (fig. 166). Si chaque alésage a son outil particulier, la longueur d'avancement est réduite à la longueur **l** de l'alésage le plus long, ce qui diminue l'usure de la barre et maintient plus longtemps la précision du travail.

MACHINES A ALÉSER

Les perceuses, les fraiseuses, les tours parallèles peuvent, dans certains cas, convenir pour des opérations d'alésage. Mais ce ne sont pas des machines à aléser.

Les aléseuses modernes, en plus de l'alésage proprement dit, autorisent des travaux de perçage, de détourage, de surfaçage, même de filetage et surtout de fraisage, ce qui les fait souvent désigner sous le nom d'**aléseuses-fraiseuses.** Les aléseuses sont à montant fixe ou à montant mobile.

Sur chacune de ces machines, les mouvements de réglage et les principes d'utilisation s'apparentent. Nous n'étudierons donc que l'aléseuse à montant fixe qui est la plus répandue.

ALÉSEUSE A MONTANT FIXE (fig. 167).

ORGANES PORTE-OUTILS

La broche tourne et glisse dans un fourreau qui tourne lui-même soit à une vitesse égale à celle de la broche, soit à une vitesse différente. Le fourreau porte un plateau qui peut :

— soit tourner en même temps que son chariot porte-outil se déplace radialement : on réalise ainsi le surfaçage ;

— soit tourner alors que le chariot est fixe, ce qui permet le détourage, l'alésage en l'air et le filetage.

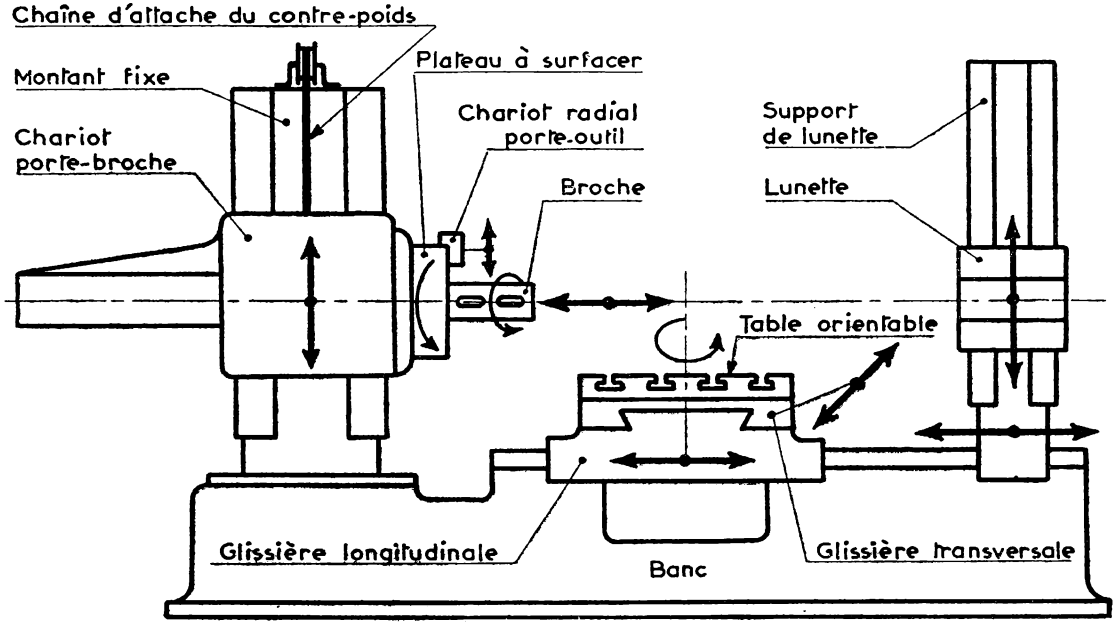


Fig. 167 — Schéma de principe d'une aléseuse-fraiseuse à montant fixe.

Le tout est supporté par le chariot porte-broche coulissant verticalement sur le montant fixe. L'équilibre de ce chariot est assuré par un contre-poids qui se déplace à l'intérieur du montant.

ORGANES PORTE-PIÈCE

Une table, fixe ou orientable dans le plan horizontal, repose sur le banc par l'intermédiaire de deux chariots croisés : le chariot transversal à déplacement perpendiculaire à l'axe de la broche et le chariot longitudinal qui glisse sur le banc parallèlement à l'axe de la broche. Le banc étant massif et rigide parce que sans pied, la table accepte sans déformation des pièces lourdes.

Donc, pièce et outil peuvent se déplacer suivant trois directions orthogonales qui permettent le positionnement précis de l'un par rapport à l'autre.

PORTE-LUNETTE

Il peut glisser et être bloqué sur le banc à l'endroit voulu. La lunette coulisse sur le porte-lunette pour s'aligner avec la broche et peut être bloquée après réglage.

ORGANES DE RÉGLAGE

Le déplacement des chariots et de la lunette est contrôlé et mesuré par des règles graduées. Des appareils optiques, lecteurs micrométriques O.P.L. par exemple, peuvent être montés pour obtenir des positionnements d'une précision de l'ordre du centième de millimètre.

TRAVAUX D'ALÉSAGE

Avant tout travail d'alésage les faces d'entrée doivent être dressées afin que l'outil attaque sur une surface plane et un métal sain. Ceci pour éviter une usure prématurée des outils qui perdent rapidement leur coupe en attaquant la croûte des surfaces brutes.

I. — ALÉSAGE A LA PERCEUSE

A. ALÉSAGE A L'ALÉSOIR

1° Alésage sur pièce pleine (fig. 168).

La pièce étant placée dans son montage d'usinage, les opérations sont les suivantes :

— perçage au foret guidé ;

— alésage à l'alésoir d'ébauche guidé (1) ;

— alésage de finition à l'outil flottant.

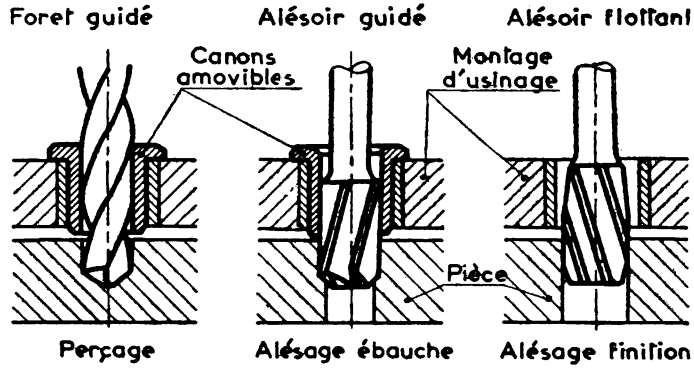


Fig. 168 — Alésage à l'alésoir sur perceuse.

(1) L'alésoir d'ébauche peut être remplacé par un foret aléseur.

Nous donnons (fig. 169) un type simple de porte-alésoir flottant. La douille porte-outil reçoit la pousée par l'intermédiaire d'une bille qui s'appuie sur un grain en acier trempé. L'axe d'entraînement en acier traité, passant dans un alésage en forme de diabolo, n'empêche aucunement le centrage de l'outil.

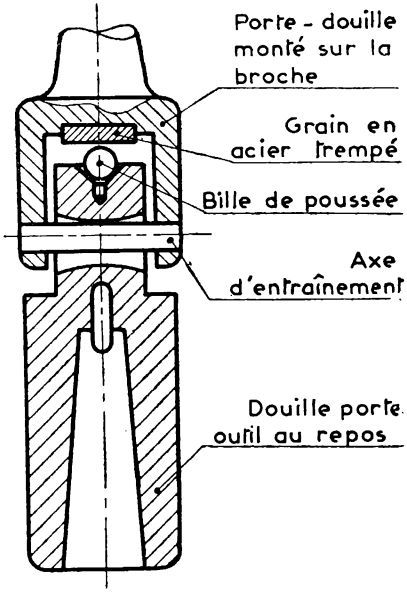

Porte - douille monté sur la broche
Grain en acier trempé
Bille de poussée
Axe d'entraînement
Douille porte outil au repos

Fig.169- Montage flottant pour alésoir.

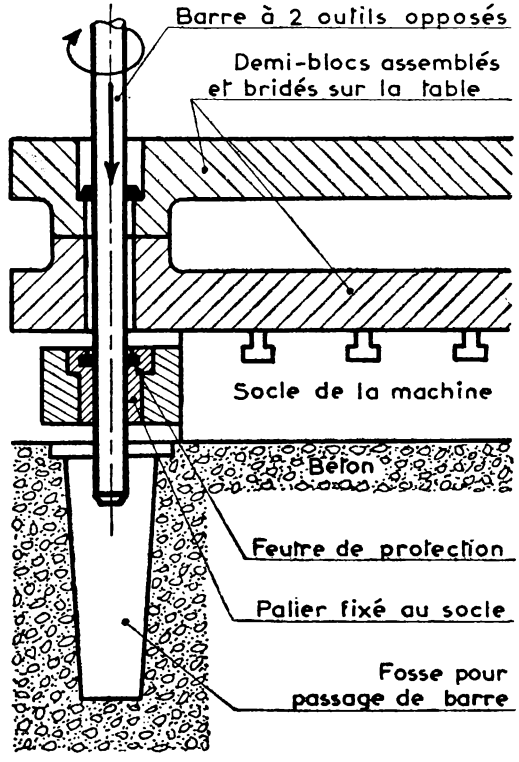

Barre à 2 outils opposés
Demi-blocs assemblés et bridés sur la table
Socle de la machine
Béton
Feutre de protection
Palier fixé au socle
Fosse pour passage de barre

Fig.170- Alésage à la barre sur perceuse radiale.

2° Alésage d'un trou brut de fonderie.

Les opérations sont : alésages d'ébauche et de demi-finition à l'outil guidé, alésage de finition à l'alésoir flottant.

B. ALÉSAGE A LA BARRE SUR PERCEUSE RADIALE

La perceuse radiale est parfois plus commode que l'aléseuse à montant mobile. Ainsi, la figure 170 représente l'alésage d'un bloc à quatre colonnes pour outil à découper ou à emboutir d'un poids de plusieurs tonnes ainsi réalisé. Ebauche et finition sont obtenues à la barre.

La précision du travail dépend de l'alignement broche-palier qui peut être contrôlé au comparateur à partir d'un cylindre de vérification. Contrôler suivant deux positions concourantes **x** et **y** dans deux sections 1 et 2 éloignées le plus possible l'une de l'autre (fig. 171).

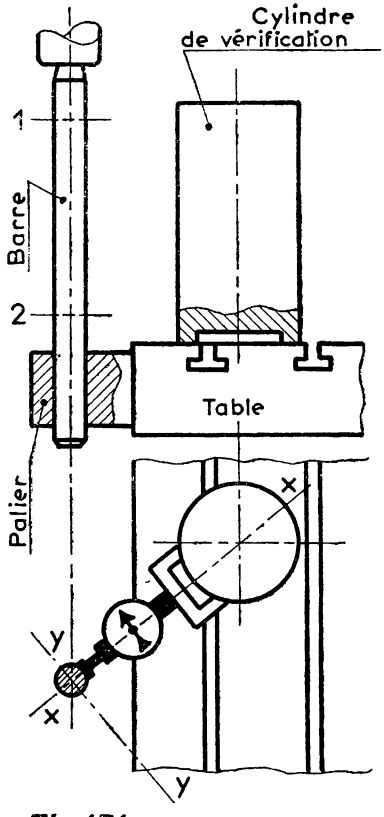


Fig:171– Alignement du palier avec la broche.

II. — ALÉSAGE AU TOUR

En plus de l'alésage à l'outil à aléser (revoir fig. 148) qui est une opération courante de tournage intérieur, il est possible de réaliser au tour des travaux d'alésage à l'alésoir et à la barre d'alésage.

A. ALÉSAGE A L'ALÉSOIR

1° Alésage court (fig. 172).

La suite des opérations est :

— ébaucher par perçage si l'alésage n'est pas venu de forge ou de fonderie ;

— amener le trou au rond à 0,2 ou 0,3 *mm* de la cote avec l'outil à aléser ;

— aléser à l'alésoir de finition monté flottant (il peut être monté rigide à condition d'être parfaitement aligné).

2° Alésage long (fig. 173).

Une première partie, considérée comme alésage court, sera usinée comme précédemment puis protégée par une douille en fonte ou en bronze qui jouera le rôle de guide porte-outil.

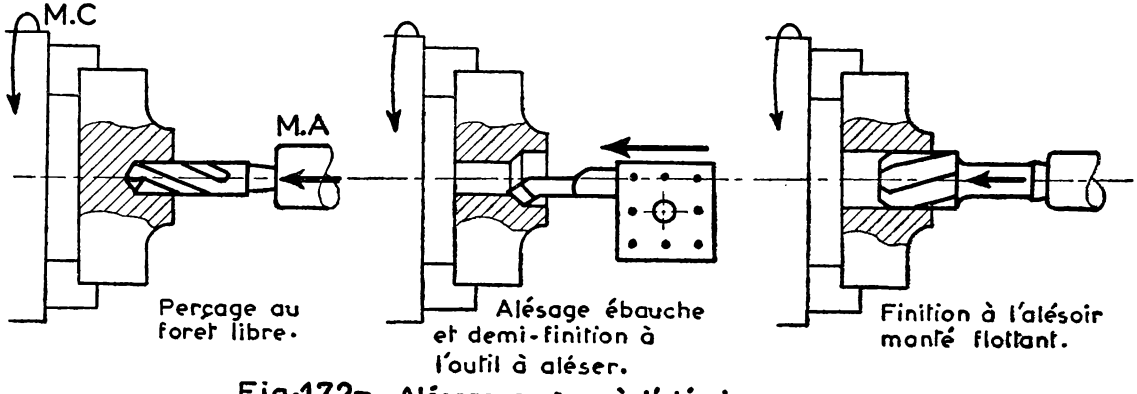


Fig:172– Alésage au tour à l'alésoir.

Les opérations sont les suivantes :

— percer au foret libre s'il y a lieu;

— amener le trou au rond à 0,2 ou 0,3 *mm* de la cote à l'outil à aléser;

— finir à l'alésoir de finition monté flottant de préférence.

Nota. — Lorsque les outils sont portés par la contre-poupée, il faut s'assurer, avant toute opération, de l'alignement du fourreau avec la broche.

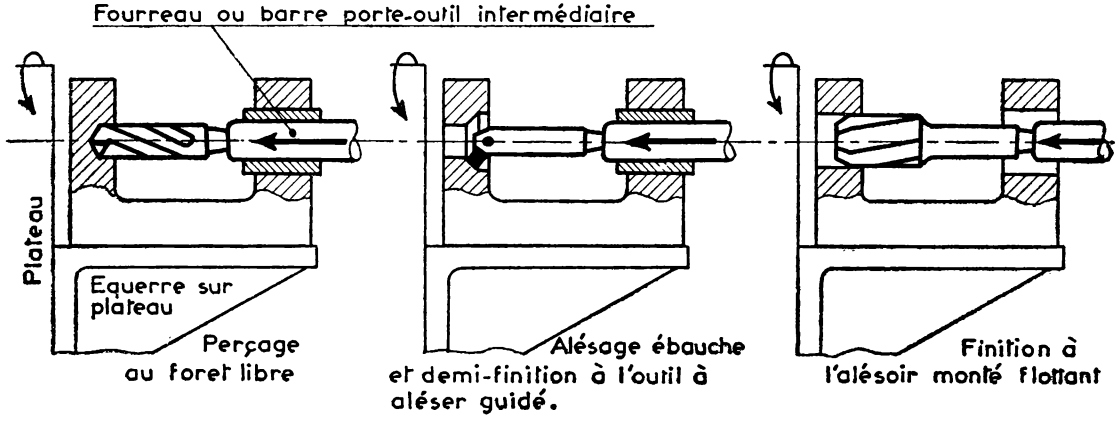

Fourreau ou barre porte-outil intermédiaire
Plateau
Equerre sur plateau
Perçage au foret libre
Alésage ébauche et demi-finition à l'outil à aléser guidé.
Finition à l'alésoir monté flottant

Fig.173- Alésage au tour, à l'alésoir, de deux paliers en ligne.

B. ALÉSAGE A LA BARRE

1° Pièce montée en mandrin ou en plateau (fig. 174).

La barre est montée dans un support spécial fixé à la tourelle porte-outil. Elle est soutenue par une lunette constituée par une douille ajustée dans le cône de la broche. L'alignement broche-

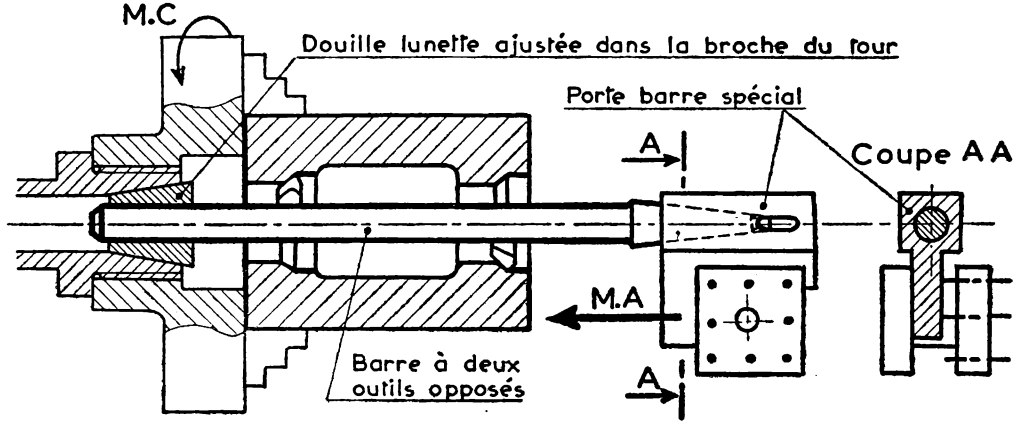


Fig.174- Alésage à la barre, au tour, pièce montée en mandrin.

barre doit être assuré avec précision. La finition peut être obtenue soit à la barre, soit à l'aide d'alésoirs creux montés sur la barre.

2° Pièce montée sur le traînard

Certains tours présentent un traînard muni de rainures à té sur lequel il est possible de monter des pièces directement ou par l'intermédiaire de montages. Dans ce cas, l'alésage à la barre est très facilité comme le montre la figure 175.

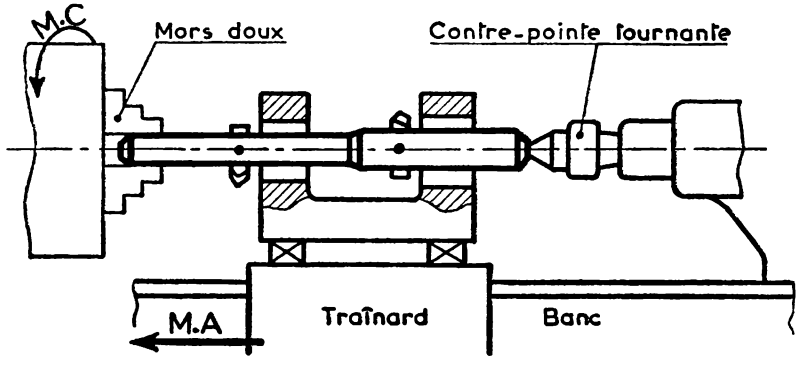


Fig:175– Alésage à la barre, au tour, pièce montée sur le traînard.

III. — ALÉSAGE A LA FRAISEUSE

On peut réaliser, sur fraiseuse, des alésages verticaux ou horizontaux à l'alésoir, à la barre en l'air ou à la barre guidée.

A. ALÉSAGES VERTICAUX

La broche étant immobile axialement, c'est la table qui doit monter pendant l'opération. Mais ce mouvement n'est possible que si la console est libre sur le bâti. Or, la console n'étant à sa position normale qu'après son blocage, il y a un jeu plus ou moins grand lorsqu'elle est libre, de sorte que l'alésage obtenu n'est pas parfaitement perpendiculaire à la table et à la face de référence de la pièce.

Pour des alésages courts et un serrage léger de la console, on peut cependant obtenir des alésages de qualités 7 et 8.

B. ALÉSAGES HORIZONTAUX

La figure 176 est un exemple d'alésage horizontal à la barre guidée. La table, dans son mouvement d'avance, est constamment en porte-à-faux. Son fléchissement peut être important et l'alésage ne sera acceptable que s'il est court et si le poids de la pièce est relativement faible.

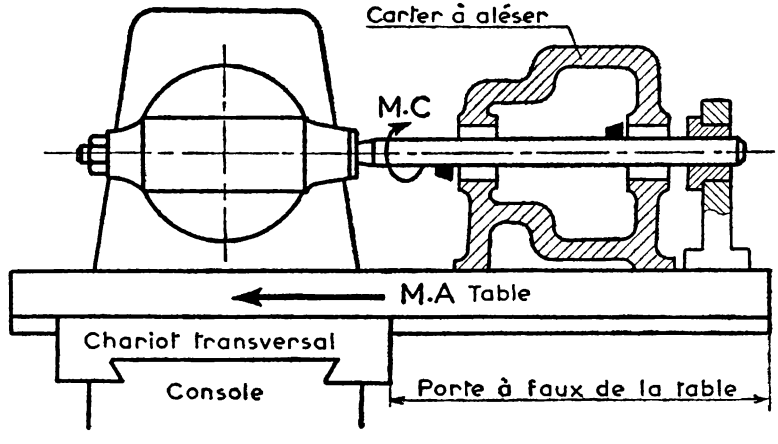


Fig:176– Alésage sur fraiseuse universelle.

C. TRAVAUX DIVERS

Lorsqu'on dispose d'un appareil à aléser universel semblable à celui de la figure 191, on peut réaliser sur fraiseuse les travaux schématisés par la figure 192. Le plateau circulaire horizontal permet enfin de réaliser des alésages cotés en coordonnées polaires (voir fig. 197).

IV. — ALÉSAGE A L'ALÉSEUSE

L'exemple de travail unitaire, sans montage d'usinage, que nous donnons ci-après, illustre les opérations classiques faites sur l'aléseuse et l'utilisation de ses accessoires les plus courants.

La pièce (fig. 177) présente deux **plots d'usinage** venus de fonderie. Ces plots, ainsi que le plan de base sont usinés d'après le tracé de la pièce et servent à son dégauchissage.

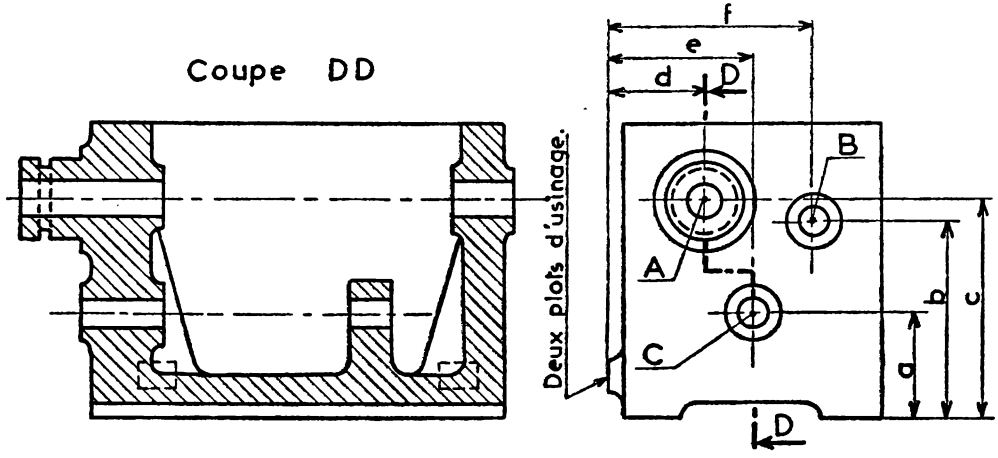


Fig:177- Carter de réducteur de vitesse.

A. ORDRE DES OPÉRATIONS.

1° Centrage de la broche.

La pièce étant dégauchie suivant les deux faces de références **SR** et bridée, il faut centrer la broche, c'est-à-dire repérer sa position par rapport aux deux surfaces **SR** (fig. 178).

A cet effet, on peut utiliser un mandrin de centrage parfaitement cylindrique placé dans la broche et des cales. L'alésage **A**, par exemple, sera positionné lorsqu'on aura monté la broche de $\mathbf{c} - (\mathbf{m} + \mathbf{r})$ et déplacé la pièce de $\mathbf{d} + \mathbf{n} + \mathbf{r}$.

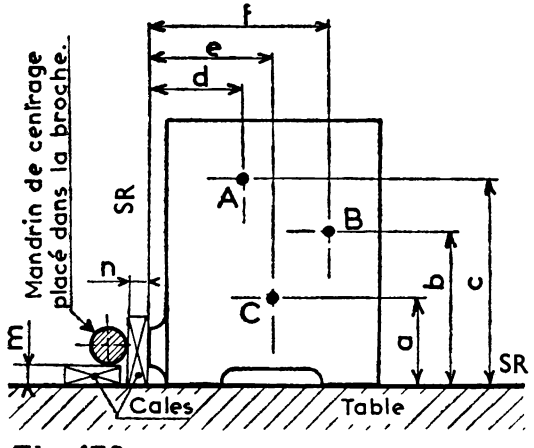


Fig:178- Centrage de la broche par mandrin et cales.

Si l'on est obligé d'utiliser un mandrin long, il faut le choisir à évidement parabolique (fig. 179) car il est ainsi beaucoup plus léger qu'un mandrin plein à résistance égale et il présente donc un moindre défaut de centrage.

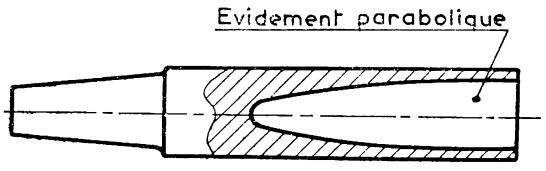


Fig:179– Mandrin long évidé pour contrôle et vérification.

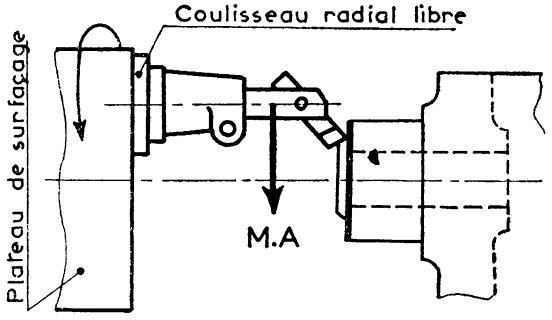


Fig:180– Dressage de la face de la portée cylindrique.

2° Dressage de la face extérieure du bossage A (fig. 180).

Monter sur le coulisseau radial du plateau à surfacer le porte-outil prévu à cet effet et laisser le coulisseau libre de se déplacer. Le réglage de la profondeur de passe est obtenu par déplacement de la table.

3° Détourage du bossgae A (fig. 181).

Le coulisseau radial est bloqué et l'avance est obtenue par déplacement de la table. Faire au moins deux passes bien cylindriques pour compensation des différences d'épaisseur du brut.

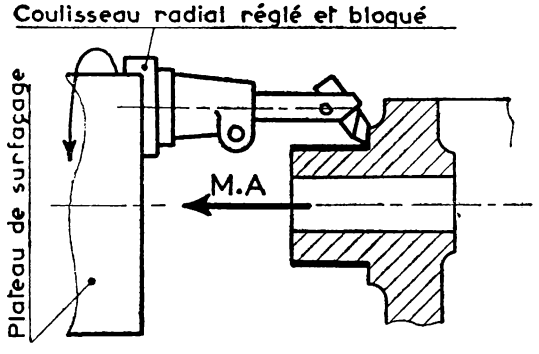


Fig:181– Détourage de la portée cylindrique.

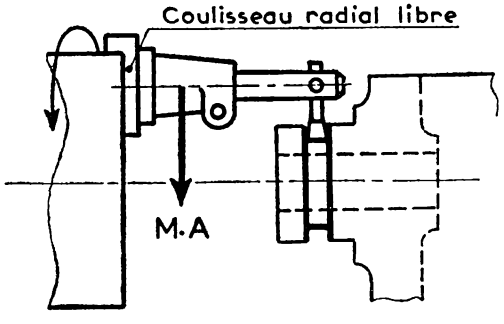


Fig:182– Usinage de la gorge.

4° Creusage de la gorge (fig. 182).

La pièce est réglée en position par déplacement de la table, le coulisseau est libre. Selon sa largeur, la gorge est obtenue par un outil d'enveloppe en plusieurs passes ou par outil de forme en une seule avance.

5° Alésage de A et de B.

Il faut tout d'abord régler la lunette en hauteur comme l'indique la figure 183. La barre doit tourner parfaitement rond. Dans le plan vertical (plan de figure), l'alignement broche-lunette est assuré par construction et l'ouvrier n'a pas à s'en préoccuper.

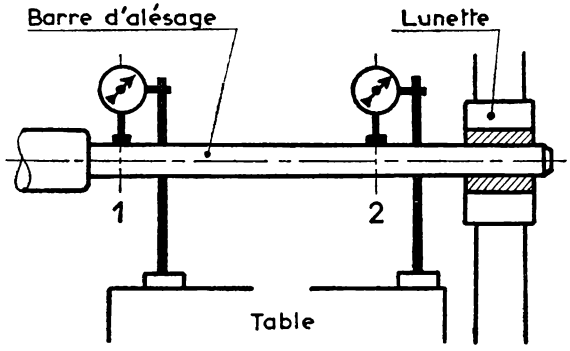


Fig:183- Réglage en hauteur de la lunette.

Ces deux alésages traversent tout le carter. La figure 184 en montre l'usinage à la barre portante deux outils opposés. La finition peut être obtenue par alésoirs creux, par deux blocs à deux outils opposés ou encore par l'outil Microbore (fig. 158).

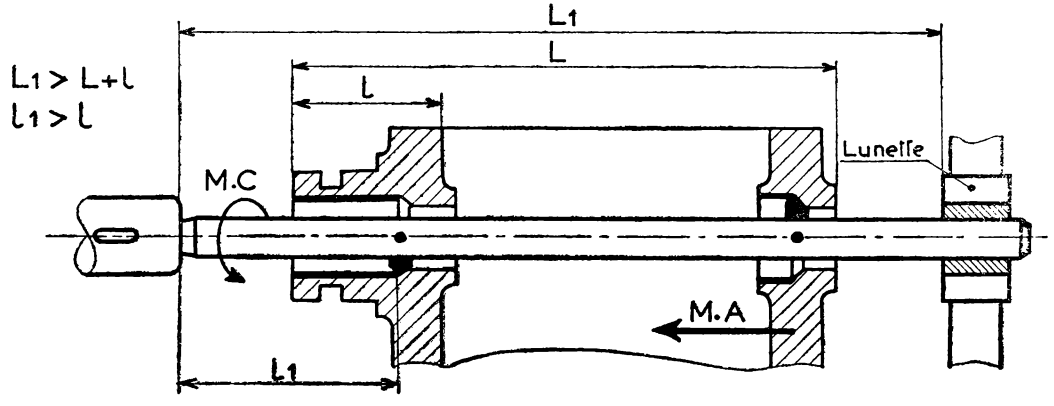


Fig:184- Alésage à la barre des paliers traversant le carter.

6° Alésage de C.

Le palier extérieur étant alésé, ce qui ne présente aucune difficulté, y introduire un guide dans lequel passera la barre épaulée de préférence. Ce maintien rigide permettra l'ébauche graduelle du palier noyé (fig. 185) sans faux rond. On terminera à l'alésoir monté flottant de préférence (fig. 186).

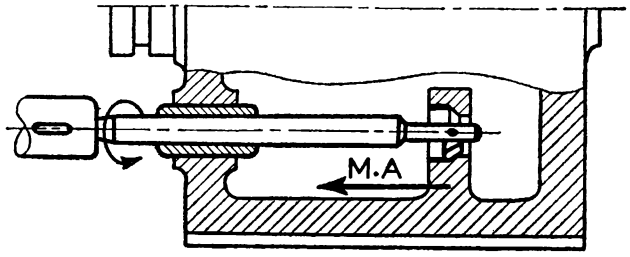


Fig:185- Alésage-ébauche à la barre du palier noyé.

7° Dressage des bossages intérieurs et extérieurs.

La figure 187 illuste ce travail. Il est réalisé à l'aide de deux fraises à deux faces montées sur un arbre. Cet arbre peut porter un emmanchement à baïonnette qui facilite le positionnement et empêche la fraise de glisser sous l'effort d'avancement. Les faces 1 et 3 peuvent être dressées simultanément au cours de l'avance a_1, la face 2 au cours de l'avance a_2.

Les fraises à deux faces présentent l'avantage de ne pas obliger à des changements de rotation de la broche.

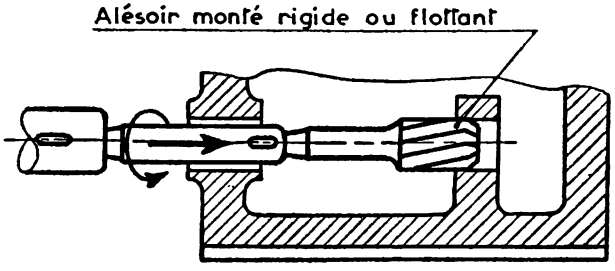


Fig:186- Alésage-finition à l'alésoir du palier noyé.

B. ALÉSAGE CONIQUE.

Il existe plusieurs types d'appareils à aléser conique. La figure 188 est le schéma du dispositif Cornac construit pour une conicité donnée.

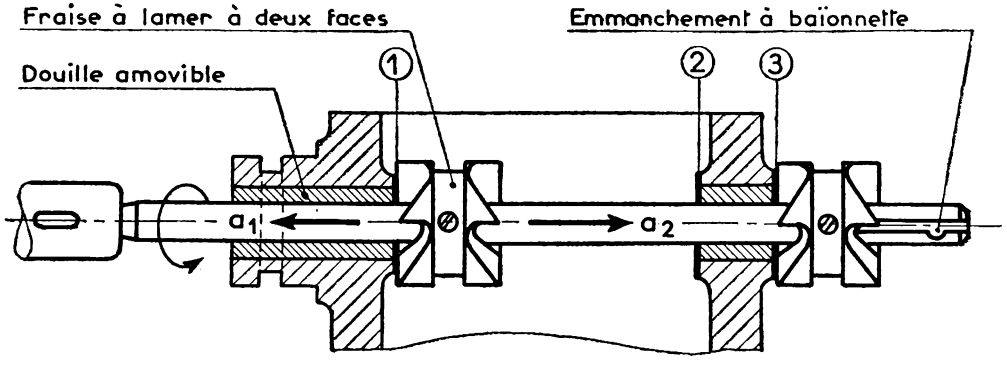


Fig:187- Lamage de bossages intérieurs et extérieurs.

Le grain doit être positionné de telle sorte que sa trajectoire et l'axe de la broche soient concourants; dans le cas contraire, la surface obtenue serait une hyperboloïde.

Le diamètre du cône peut être atteint par réglage de l'enfoncement du grain dans la barre ou encore, ce qui est plus aisé, par déplacement axial de la pièce.

Une étoile à six branches calée sur la vis du chariot porte-outil rencontre, à chaque tour du plateau, une butée fixe réglable qui la fait tourner d'une branche et, par suite, communique une avance périodique à l'outil.

Il existe des dispositifs à conicité variable, mais ils sont moins rigides que le précédent.

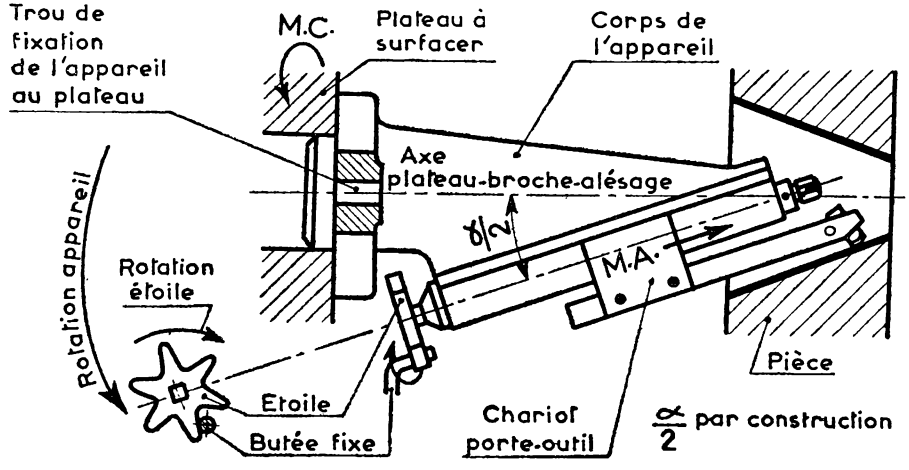


Fig:188- Schéma de l'appareil à aléser conique "Cornac"

ALÉSAGE DE PRÉCISION A LA MACHINE A POINTER

Les machines à pointer sont des machines à percer et à aléser de haute précision. Elles assurent le positionnement des alésages entre eux et par rapport à l'origine avec des variations qui ne dépassent pas quelques microns. Les déplacements des chariots sont contrôlés par des règles-étalons doublées d'un système de mesure optique (1). Les vis de commande des chariots sont munies de correcteurs des erreurs de pas (1).

I. — OUTILS DE COUPE UTILISÉS SUR MACHINE A POINTER

A. FORETS.

Ce sont les mêmes que ceux utilisés sur perceuse (voir p. 73).

---

(1) Voir déplacement des chariots, première partie, classe de Première.

B. ALÉSOIRS.

Leur particularité réside en ce qu'ils ne présentent pas de cône d'action. Les arêtes coupantes sont en bout et sur toute leur longueur normales à l'axe (fig. 189-2). On évite ainsi la flexion de l'outil par action transversale **R** lorsque le trou percé n'est pas parfaitement aligné sur l'alésoir (fig. 189-1). Le déséquilibre entre $\mathbf{F}_{a1}$ et $\mathbf{F}_{a2}$ est pratiquement sans effet sur la tenue de l'outil.

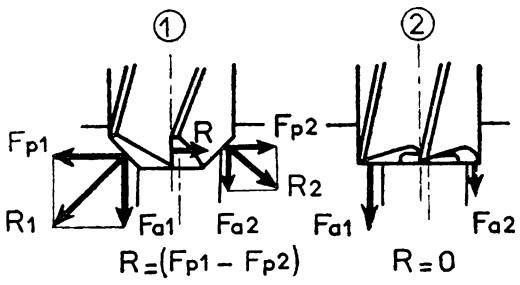


Fig:189- La poussée horizontale R est nulle pour des arêtes coupantes normales à l'axe.

C. OUTILS D'ENVELOPPE A ALÉSER.

Ils sont identiques, dans leur forme générale, à ceux employés sur le tour ou sur l'aléseuse pour ces opérations. Leur partie active est en carbure métallique et ils sont montés dans des porte-outils spéciaux.

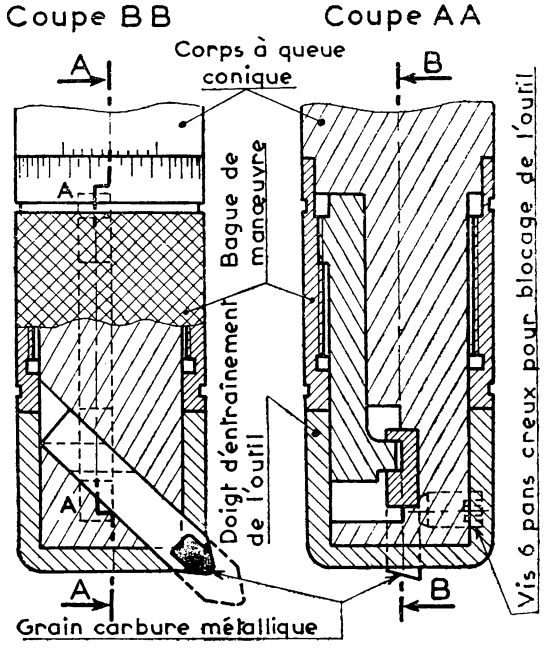


Fig:190- Porte-outil à aléser à réglage micrométrique.

1° Porte-outil à réglage micrométrique (fig. 190).

Ce porte-outil permet un réglage du grain de l'ordre de 5μ. En tournant la bague de manœuvre, fixe en translation, on provoque la descente du doigt d'entraînement qui, s'appuyant dans une encoche du grain, l'oblige à sortir du corps en raison de sa position oblique. Le déplacement de l'outil est mesuré sur la graduation portée par la douille à l'aide du vernier gravé sur le corps.

2° Porte-outil universel à aléser et à détourer.

La figure 191 montre l'ensemble du porte-outil universel Super.

L'avance radiale du chariot porte-outil peut être commandée manuellement ou automatiquement; l'avance automatique est provoquée par une tige de butée qui, introduite dans un trou de la bague d'avance, la maintient immobile en s'appuyant sur le bâti de la machine.

On peut donc régler ainsi la profondeur de passe d'un alésage, exécuter des gorges, des chambrages, des surfaçages et des détourages (fig. 192). Le réglage de l'outil se fait avec précision par lecture d'un tambour micrométrique.

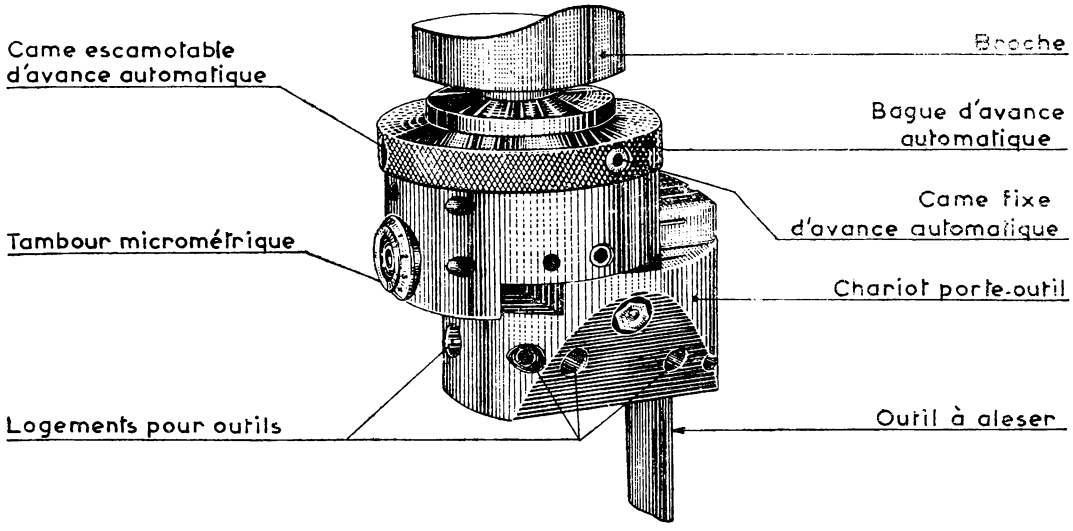


Fig:191- Appareil universel à aléser et à détourer "Super"

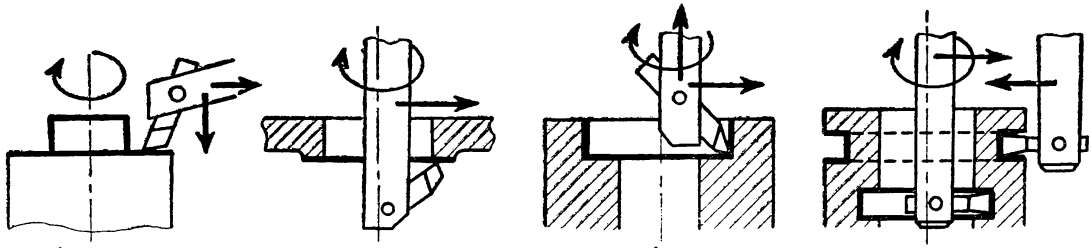


Fig:192- Quelques travaux réalisables à l'appareil à aléser universel.

II. — ACCESSOIRES POUR MACHINE A POINTER

La précision du travail dépend du repérage exact de la broche de la machine par rapport à l'origine des cotes. Des accessoires extrêmement précis, que nous étudierons ci-après, permettent ce repérage. Le travail de perçage et d'alésage proprement dit ne présente ensuite rien de particulier.

A. MICROSCOPE DE POINTAGE (fig. 193).

Lorsque le microscope est monté dans la broche de la machine, son axe est aligné sur le centre du réticule. On peut donc pointer ce centre sur le point de référence de l'usinage. Le miroir inférieur orientable éclaire la pièce dans la région intéressée.

B. ÉQUERRE DE CENTRAGE (fig. 194).

Une branche de l'équerre porte extérieurement un trait très fin, **la ligne de foi,** qui est dans le plan d'appui intérieur de l'autre branche.

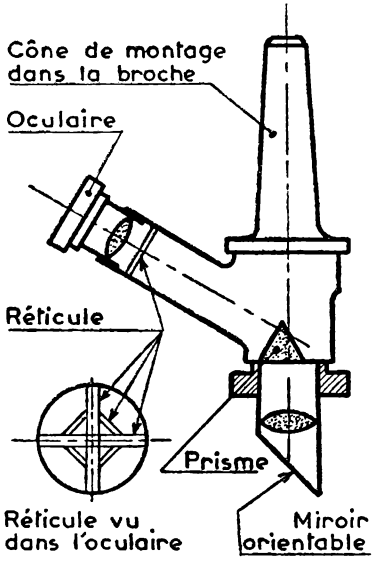


Fig:193- Microscope de pointage.

L'équerre étant appliquée contre une face de référence de la pièce, lorsque la ligne de foi est située au milieu de l'intervalle entre les fils du réticule, la face de référence contient l'axe de la broche (fig. 195).

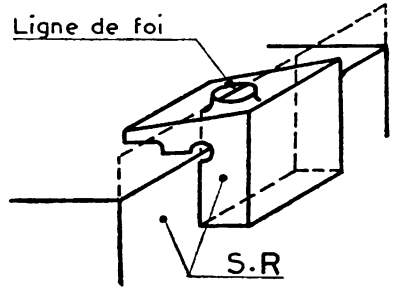


Fig:194- Equerre de centrage. La ligne de foi est dans le plan de la surface S.R

La conjugaison de deux réglages sur les faces d'un même dièdre permet le pointage sur l'origine des cotes (fig. 196). Ensuite, par déplacements mesurés de la table et du chariot porte-broche, on obtient le positionnement précis de chaque alésage (cotes **a** et **d**, **b** et **f**, **c** et **e**).

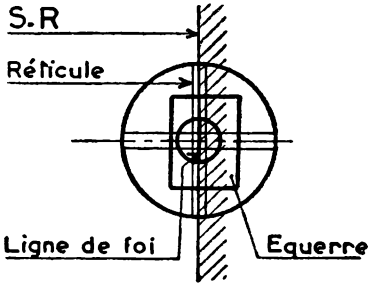


Fig:195- La surface S.R de la pièce contient l'axe de la broche.

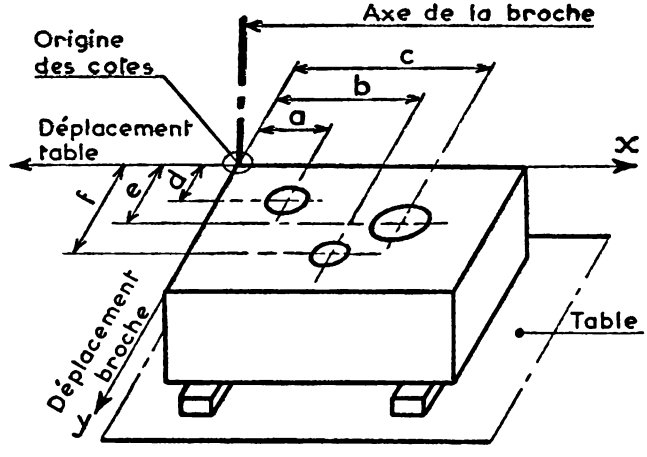


Fig:196- Pointage de l'origine des cotes.

C. PLATEAU DIVISEUR CIRCULAIRE.

Dans son principe, il est identique à celui qu'on utilise sur fraiseur. On s'en sert surtout pour l'usinage de pièces cotées en coordonnées polaires (fig. 197).

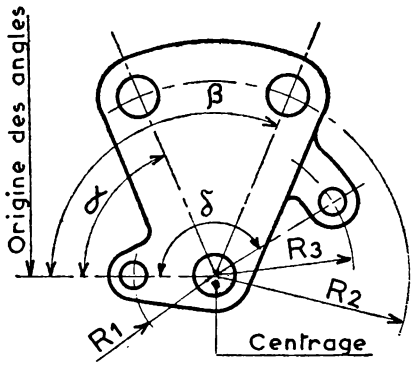


Fig:197– Cotation en coordonnées polaires.

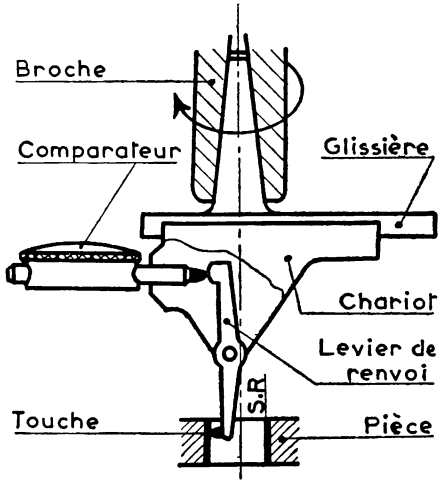


Fig:198–Indicateur de centrage.

Le positionnement du plateau sur la table est contrôlé à l'aide d'un **indicateur de centrage** (fig. 198). La touche de l'indicateur peut prendre appui contre le têton de centrage ou contre la pièce centrée par ce têton. Si l'aiguille du comparateur reste immobile lorsqu'on tourne la broche à la main, le plateau et la pièce sont centrés. Le déplacement angulaire du plateau diviseur est assuré par un plateau à trous (1).

D. PLATEAU DIVISEUR CIRCULAIRE INCLINABLE.

Le schéma d'ensemble est donné par la figure 199. Le plateau, en plus de son mouvement de rotation autour de son axe, peut pivoter autour d'un autre axe parallèle à la table. Les distances l_1 et l_2 du centre de pivotement aux deux surfaces de référence **SR** sont connues.

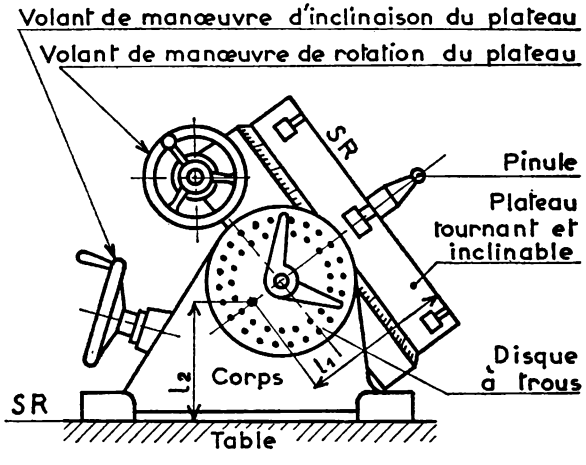


Fig:199– Plateau diviseur inclinable.

(1) Voir cours de « Spécialité Fraisage ».

La rotation du plateau peut être contrôlée par une graduation en degrés ou, pour plus de précision, par un plateau à trou.

Dans l'axe du plateau peut se loger un centrage terminé par une sphère dite **pinule de centrage.**

Le plateau étant incliné, son centrage se fait à l'aide de l'indicateur spécial (fig. 200). Tant que le centre de la sphère n'est pas dans l'axe de la broche, si l'on fait tourner celle-ci à la main, le comparateur qui tourne avec elle indique une déviation. En effet, l'axe du levier coudé (fig. 201) décrit une circonférence qui est dans un plan $\mathbf{P}_2$ oblique par rapport au plan $\mathbf{P}_1$ perpendiculaire

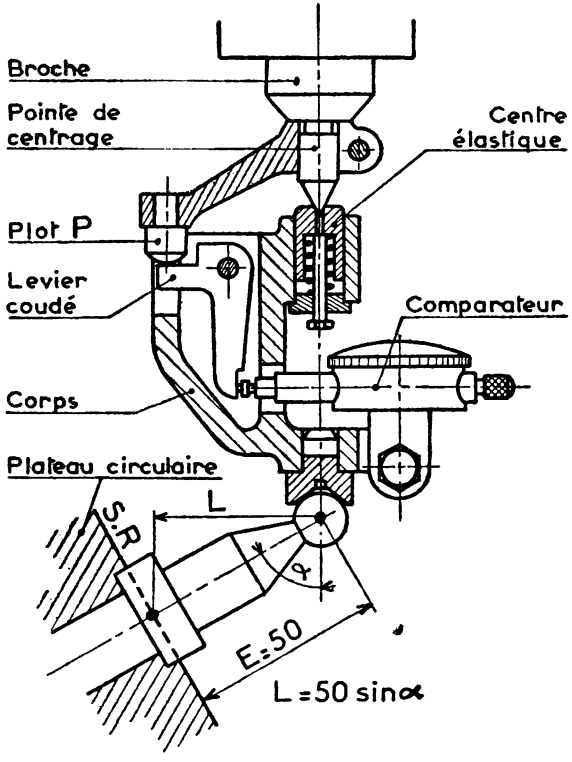


Fig:200- Pinule de centrage

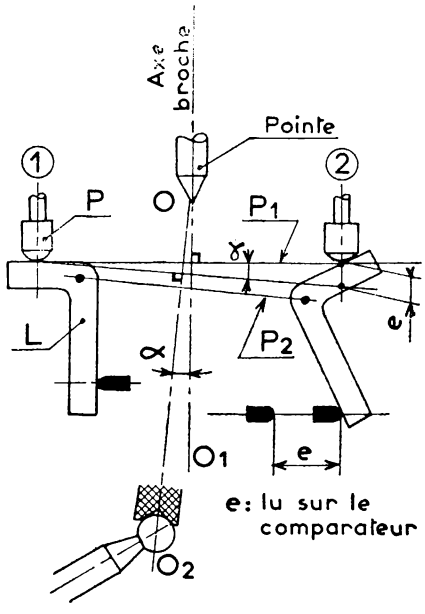


Fig:201- Indication du défaut de centrage.

à l'axe de la broche décrit par le plot **P** et le comparateur indique la valeur de l'écart **e.** Quand l'aiguille reste immobile, $\mathbf{P}_1$ et $\mathbf{P}_2$ sont parallèles, $\mathbf{e} = 0$ et le centre de la sphère est aligné sur l'axe de la broche.

La distance **E** (fig. 200) étant constante (50 *mm* en général) et α étant connu (inclinaison du plateau), on peut ainsi rapporter l'origine des cotes au centre de la sphère. La figure 202 est un exemple de travail à réaliser au plateau inclinable. Le calcul des cotes **m, n, x, y** et **z** permet à l'opérateur de respecter les cotes **a, b... f** et **g.**

E. BRAS PORTE-CANON (fig. 203).

Pour le perçage et l'alésage de petits trous, un bras porte-canon fixé au chariot porte-broche reçoit les canons amovibles. Un système de verrouillage empêche le canon utilisé de tourner et de remonter.

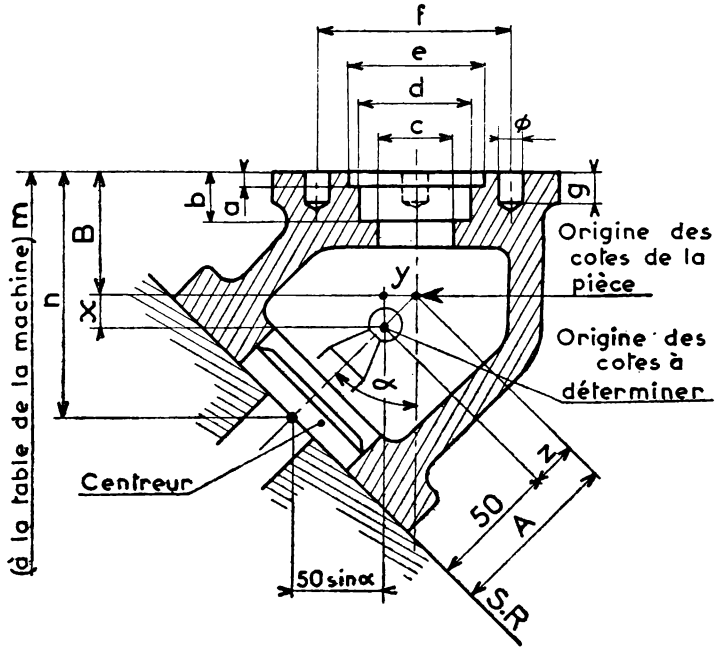


Fig:202- Détermination de cotes d'après le centrage de la broche à la pinule.

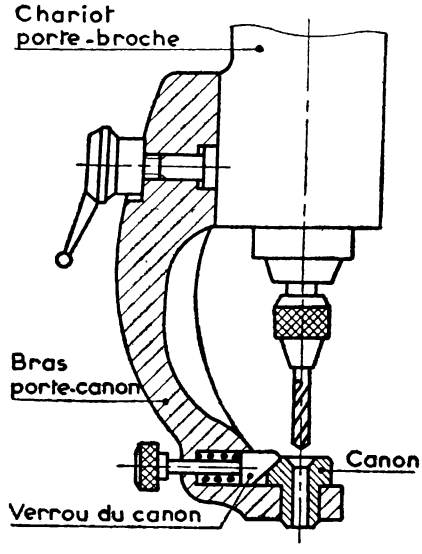


Fig:203-Bras porte-canon

LES TRAVAUX DE TOURNAGE

I. — GÉNÉRALITÉS

Nous n'envisagerons dans cette étude que les travaux de tournage relatifs à l'obtention des surfaces cylindriques et coniques, extérieures ou intérieures. Mais il ne faut pas oublier que, par tournage, on peut obtenir toutes les surfaces de révolution : la sphère et l'hélice par exemple.

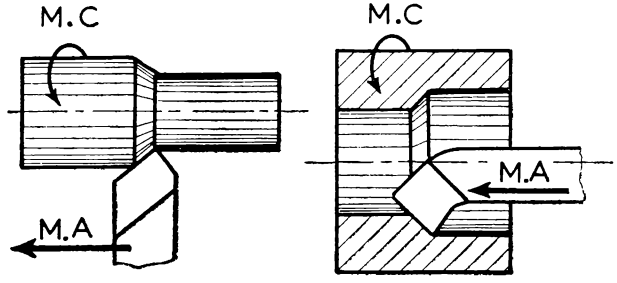


Fig:204- Tournage cylindrique.

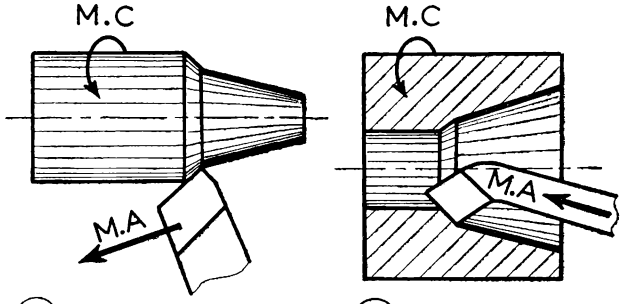


Fig:205- Tournage conique.

Ces surfaces peuvent être réalisées à l'outil de forme ou à l'outil d'enveloppe. Les surfaces de révolution usinées à l'outil de forme étant obligatoirement de faible longueur et ne présentant guère d'intérêt, nous étudierons plus spécialement le tournage à l'outil d'enveloppe (fig. 204 et 205). La pièce reçoit le mouvement de coupe **MA** sous la forme d'une rotation autour de son axe et l'outil le mouvement d'avance **MC** sous la forme d'une translation rectiligne, dont la direction est celle de la génératrice de la surface à obtenir.

II. — LES OUTILS DE TOURNAGE ET LEURS ACTIONS SUR LA PIÈCE

A. LES OUTILS D'ENVELOPPE.

1° Outil à charioter.

Cet outil, déjà étudié à plusieurs reprises, est l'outil-type de tournage. La figure 206 rappellera les actions de la pièce sur l'outil et les réactions de l'outil sur la pièce. L'influence de ces efforts sur l'état de la surface obtenue est plus sensible pour le tournage que pour le rabotage.

En effet, dans le rabotage courant (fig. 207), la pièce est appuyée sur des cales ou sur la table et abloquée. Les réactions $\mathbf{F}'_a$ et $\mathbf{F}'_p$ ne peuvent donc la déformer. D'autre part, la pièce et son support, fixes l'un par rapport à l'autre, ne peuvent pas subir d'usure mutuelle.

Il n'en est pas de même dans le tournage. En effet (fig. 208), les réactions $\mathbf{F'_c}$ et $\mathbf{F'_p}$ se composent suivant leur résultante **R** qui se reporte en $\mathbf{O_1}$ et provoque la flexion de la pièce dont le centre passe en $\mathbf{O_2}$. Le rayon de la section obtenue passe de $\mathbf{O_1A}$ à $\mathbf{O_2A}$ et on a $\mathbf{r_2 > r_1}$. La flèche prise par l'axe de la pièce au droit de l'outil est $\mathbf{r_2 - r_1 = f}$.

Étudions l'effet de cette flèche sur la correction de la surface tournée.

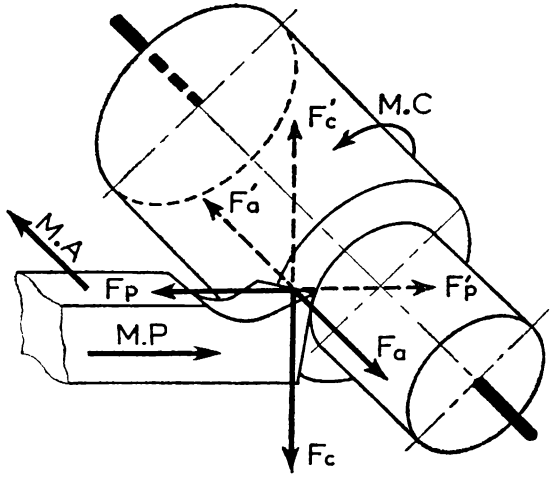


Fig:206- Actions de la pièce sur l'outil et réactions de l'outil sur la pièce.

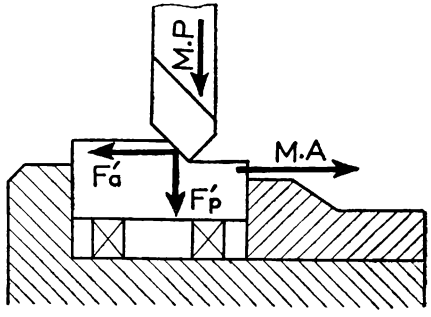


Fig:207- Les réactions F'p et F'a ne déforment pas la pièce.

a) Tournage en l'air (fig. 209). Lorsque l'outil attaque en 1, le porte-à-faux est maximum, et la flèche prise par la pièce est maximum. Elle est plus faible en 2 car $\mathbf{l_2 < l_1}$. Donc le diamètre **D** en 1 est plus grand que le diamètre **d** en 2 et la pièce est de forme évasée.

La flèche de la pièce est de la forme $\mathbf{f = k\dfrac{Rl^3}{EI}}$. Comme $\mathbf{I = \dfrac{\pi d^4}{64}}$, moment d'inertie de la section circulaire par rapport à son axe, on a $\mathbf{f = k\dfrac{R}{E} \times \dfrac{64}{\pi} \times \dfrac{l^3}{d^4}}$. Pour le même effort **R** et le

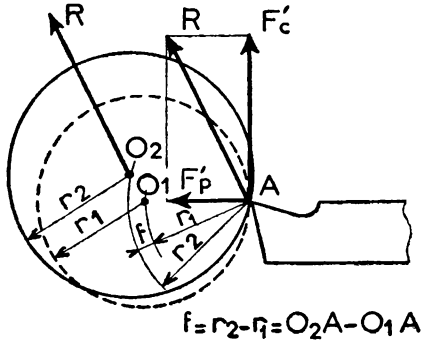


Fig:208- Effet des réactions de l'outil sur la pièce tournée.

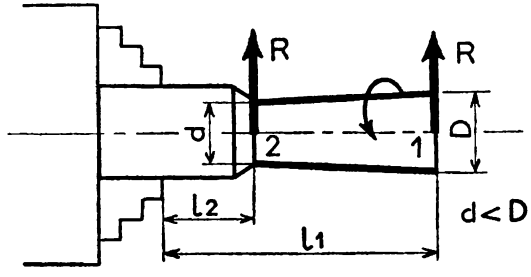


Fig:209- Tournage en l'air, la pièce est tronconique.

même métal façonné (module d'élasticité $\mathbf{E}$ constant), la flèche dépend donc du rapport $\frac{\mathbf{l^3}}{\mathbf{d^4}}$. Si nous posons $\mathbf{l = nd}$, la flèche dépendra de $\frac{\mathbf{n^3 d^3}}{\mathbf{d^4}} = \frac{\mathbf{n^3}}{\mathbf{d}}$. Lorsqu'on aura, par exemple, $\mathbf{n} = 2$, soit une longueur double du diamètre, la flèche dépendra de $\frac{2^3}{\mathbf{d}} = \frac{8}{\mathbf{d}}$ et lorsque la longueur sera moitié du diamètre, soit $\mathbf{n} = \frac{1}{2}$, la flèche ne dépendra plus que de $\frac{\left(\frac{1}{2}\right)^3}{\mathbf{d}} = \frac{\mathbf{d}}{8}$. Elle sera donc $8 \times 8 = 64$ fois plus faible.

En pratique, on limite le porte-à-faux à une longueur inférieure au double du diamètre : $\mathbf{l < 2d}$.

Pour un cylindre en acier de longueur $\mathbf{l} = 60$, de diamètre $\mathbf{d} = 30$ et un effort $\mathbf{R} = 110$ *kg f*, la flèche serait sensiblement $\mathbf{f} = \frac{1}{3} \times \frac{\mathbf{R}}{20\,000} \times \frac{64}{3{,}14} \times \frac{8}{\mathbf{d}} = \frac{3 \times 20\,000 \times 3{,}14 \times 30}{110 \times 64 \times 8} = 0{,}01$ *mm*.

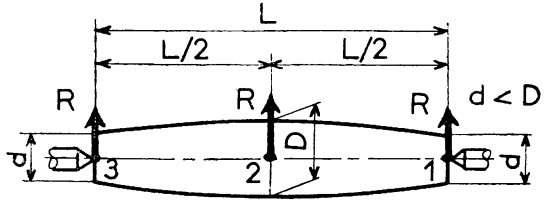


Fig: 210 – Tournage entre-pointes. La pièce est bombée "en tonneau"

La différence des diamètres serait donc $0{,}01 \times 2 = 0{,}02$ *mm*, incorrection non négligeable.

b) Tournage entre pointes (fig. 210).

En 1 et 3 la flèche est nulle car les pointes équilibrent directement la résultante **R**. La flèche est maximum en 2 lorsque l'outil est à égale distance des pointes.

Le raisonnement précédent est encore valable ici, puisque la valeur de la flèche est toujours de la forme $\mathbf{f} = \mathbf{k}\frac{\mathbf{Rl^3}}{\mathbf{EI}}$.

Pour un cylindre en acier de longueur $\mathbf{l} = 300$ et de diamètre 30, par exemple, et un effort $\mathbf{R} = 110$ *kgf*, la flèche à mi-longueur serait sensiblement :

$$\mathbf{f} = \frac{1}{48} \times \frac{\mathbf{R}}{20\,000} \times \frac{64}{3{,}14} \times \frac{\mathbf{l^3}}{\mathbf{d^4}} = \frac{110 \times 64 \times 300^3}{48 \times 20\,000 \times 3{,}14 \times 30^4} = 0{,}08\ mm$$

La différence des diamètres serait donc de $0{,}08 \times 2 = 0{,}16$ *mm*, incorrection à peine acceptable en travail d'ébauche (1).

Conclusions pratiques.

a) La flexion des pièces provoquant la variation de leur diamètre, il est de toute nécessité pour le tournage des pièces longues, de les soutenir par une lunette qui empêche les déformations.

---

(1) L'ouvrage « Organisation industrielle » par A. Castell donne un abaque qui permet de déterminer la différence de diamètre due à la flexion pour les pièces tournées entre pointes.

b) Lorsqu'une pièce finie doit présenter un étranglement de section dans sa partie médiane, il ne faut l'exécuter qu'en dernier lieu (fig. 211).

c) Une pièce montée en mandrin et pointe est plus rigide que montée entre pointes. La partie prise en mandrin peut être considérée en effet comme encastrée (fig. 212).

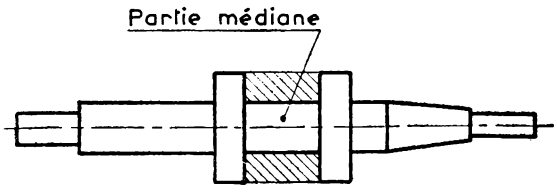


Fig: 211– La partie médiane affaiblie est usinée en dernier lieu.

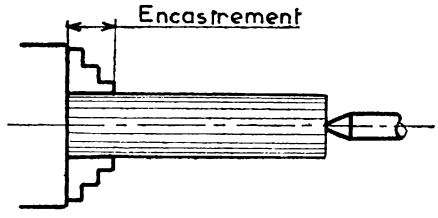


Fig:212– Pièce montée en mandrin et pointe.

d) La flexion des pièces justifie l'usinage en deux opérations : ébauche, puis finition. Au cours de la finition, la section du copeau est très petite et l'action **R** est grandement diminuée. Par suite, le diamètre reste sensiblement constant.

2° Outil couteau (fig. 213).

C'est l'outil type pour lequel l'effort de pénétration $\mathbf{F}'_p$ est nul. La réaction de l'outil $\mathbf{F}'_a$, de même sens que le mouvement d'avance, est pratiquement sans effet pour la flexion de la pièce, Il n'y a donc, pour provoquer cette flexion, que la composante $\mathbf{F}'_c$ qui est inférieure à **R** (revoir fig. 206).

Cette remarque justifie l'emploi de l'outil couteau pour le tournage des pièces longues mais, dans ce cas, il faut pratiquer sur le bec de l'outil un léger plat perpendiculaire à l'arête coupante pour réduire les défauts dans le sens de l'avance et il faut travailler par petites passes.

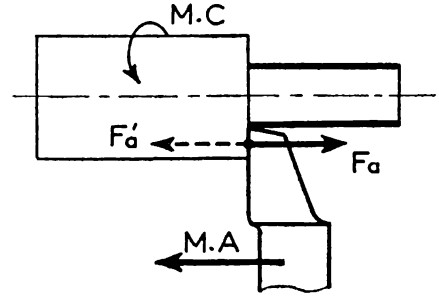


Fig:213– Tournage à l'outil couteau. L'effort F'p est nul.

B. OUTILS DE FORME.

Nous rappellerons seulement que, pour un outil à gorge à fond arrondi (fig. 214-a), la valeur de la pente effective de coupe varie en tous points de l'arête coupante ; elle est maximum au point 1 et nulle aux points 2 (1).

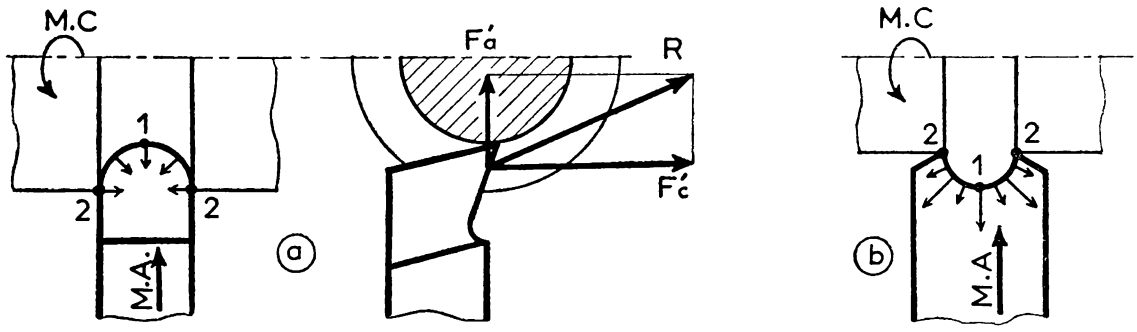
De plus, la réaction $\mathbf{F}'_c$ de l'effort de coupe et la réaction $\mathbf{F}'_a$ de l'effort d'avancement, qui est ici un effort de pénétration, admettent une résultante **R** plus grande que pour le chariotage dans les mêmes conditions de coupe.

---

(1) Voir Étude des outils de forme, classe de Deuxième.

Il en résulte que le travail à l'outil de forme provoque une plus grande flexion de la pièce que le travail à l'outil d'enveloppe et parfois même un broutement mécanique qui amplifie le broutement naturel.

Enfin, il est bon de remarquer que le copeau s'écoule mal pour un outil convexe (fig. 214-a)



Outil à rayons d'écoulement convergents.

Outil à rayons d'écoulement divergents.

Fig: 214– Tournage à l'outil de forme.

car les rayons sont convergents. Ils sont divergents pour un outil concave (fig. 215-b) et le copeau se dégage mieux.

C. MESURE ET VALEUR DES EFFORTS DE COUPE.

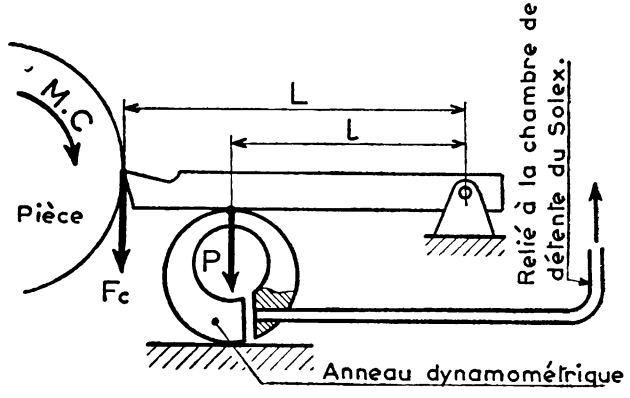


Fig: 215– Mesure de l'effort Fc au dynamomètre "Mécalix"

1° Mesure à l'anneau dynamométrique.

On peut mesurer les efforts de coupe à l'aide d'un anneau dynamométrique Mécalix (fig. 215).

L'outil expérimental articulé exerce sur l'anneau fendu un effet **P** qui ferme plus ou moins la fente constituant le gicleur de sortie de la chambre de détente du comparateur Solex à laquelle elle est reliée. On peut donc mesurer la force **P** par la différence de niveau dans le tube manométrique gradué en kilogrammes, l'appareil étant étalonné avant emploi en conséquence.

On a alors $\mathbf{F_c = \frac{Pl}{L}}$ car, par rapport à l'articulation $\mathbf{Pl = F_c L}$.

2° Mesure au pont d'extensométrie

Deux jauges de contrainte J_1 et J_2, constituées par une résistance électrique d'encombrement réduit (8 *mm* × 3 *mm*) sont disposées l'une au-dessus et l'autre au-dessous du corps de l'outil (fig. 216-1). Elles sont rendues solidaires des déformations superficielles de l'outil par collage soigneux puis protégées.

L'outil étant au repos, J_1 et J_2 sont incorporées dans un pont de Vheatstone, alimenté en alternatif, que l'on équilibre par une résistance de réglage **R** (fig. 216-2). Toute déformation de l'outil se traduit par une variation de résistance qui déséquilibre le pont.

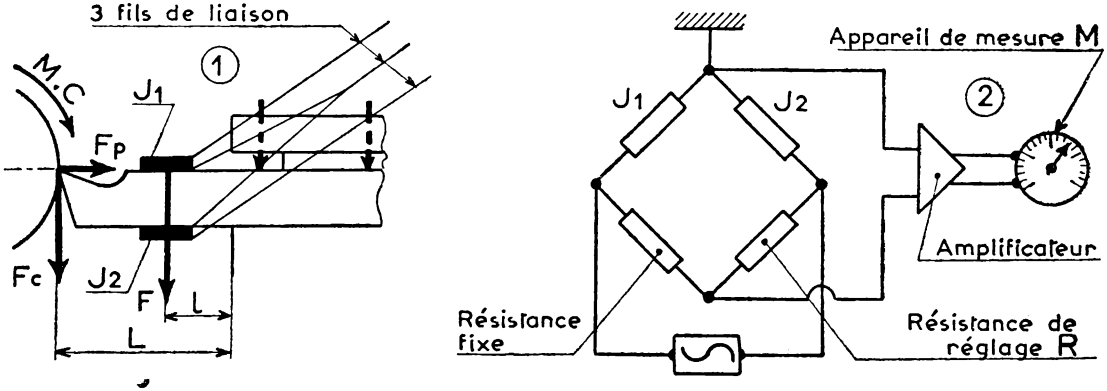


Fig. 216- Mesure de l'effort de coupe au pont d'extensométrie.

Ce montage permet :

— de compenser les variations de résistance **ΔR** provenant de la température;

— de doubler la sensibilité du pont, donc de l'appareil de mesure;

— de compenser les efforts de compression de l'effort de pénétration $\mathbf{F}_p$.

L'appareil de mesure **M** indique la valeur moyenne de l'effet **F**. On en déduit $\mathbf{F}_c = \dfrac{\mathbf{Fl}}{\mathbf{L}}$.

D. CALCUL APPROXIMATIF DES EFFORTS ET DE LA PUISSANCE DE COUPE.

L'évaluation expérimentale montre que la valeur de l'effort de coupe est donnée par la relation :

$$\mathbf{F}_c = \mathbf{k}(\mathbf{R}_r)_e \mathbf{S}$$

dans laquelle **k** est un coefficient qui varie de 3 à 4 pour les aciers et de 4 à 5 pour les fontes, $(\mathbf{R}_r)_e$ est la charge de rupture à l'extension du métal usiné, **S** est la section du copeau en mm^2.

D'après les essais effectués pour l'outil à charioter, on peut admettre que $\mathbf{F}_a$ et $\mathbf{F}_p$ ont une valeur sensiblement égale à la moitié de $\mathbf{F}_c$.

La puissance de coupe totale est donc $\mathbf{F}_c \times \mathbf{V}_c + \mathbf{F}_a \times \mathbf{V}_a + \mathbf{F}_p \times \mathbf{V}_p$. Or, la vitesse de de pénétration $\mathbf{V}_p$ est nulle et la vitesse d'avance $\mathbf{V}_a$ négligeable. La puissance de coupe est donc donnée en définitive par la relation :

$$\mathbf{P}_c(kgm/s) = \frac{\mathbf{F}_c(kgf) \times \text{vitesse de coupe } (m/mn)}{60}$$

Si le rendement mécanique du tour est de 0,8, la puissance nécessaire au moteur est :

$$\mathbf{P}_m = \frac{\mathbf{F}_c \times \mathbf{V}m/mn}{60 \times 0{,}8}$$

Ex. : Pour un acier **A**56, une section de copeau $\mathbf{S} = 1{,}25\ mm^2$ et une vitesse de coupe $\mathbf{V} = 64\ m/mn$, on aura au minimum :

$$\mathbf{F}_c = 3 \times 56 \times 1{,}25 = 210\ kgf \text{ ou } 2\,060\ N$$

$$\mathbf{P}_m = \frac{210 \times 64}{60 \times 0{,}8} = 280\ kgm/s \text{ soit environ } 4\ ch \simeq 2\,944\ w$$

E. DÉFAUTS DES PIÈCES TOURNÉES.

Conjointement aux défauts macrogéométriques provoqués par la flexion des pièces, on constate des défauts microgéométriques qui proviennent principalement :

— de la grandeur de l'avance (sillon hélicoïdal) ;

— de la forme de l'outil : obliquité du profil et forme du bec ;

— du broutement naturel provoqué par les variations de l'effort de coupe inhérentes à la formation du copeau et du manque d'homogénéité du métal façonné.

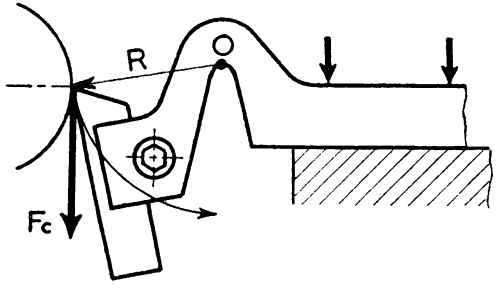


Fig: 217– Outil à trajectoire élastique dégageante.

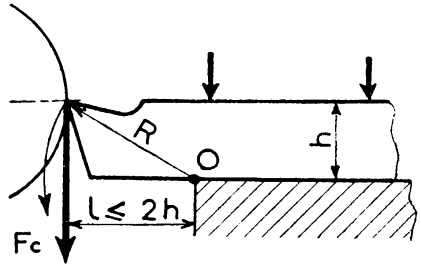


Fig: 218– Outil à trajectoire élastique engageante.

Une trajectoire élastique dégageante (fig. 217) diminue le broutement naturel ainsi que l'usure de l'outil. Toutefois, pour un **outil rigide** à trajectoire élastique engageante (fig. 218), le broutement naturel est très réduit, surtout si la section du copeau est faible (cas des passes de finition), et l'usure est négligeable.

La rigidité de l'outil est assurée si son porte-à-faux est au plus égal à deux fois la hauteur du corps (fig. 218), compte tenu évidemment du copeau maximum compatible avec la section du corps de l'outil.

Pour un corps d'outil en acier mi-dur de section **S** mm² et un porte-à-faux **l** = **2h**, on peut admettre une section de copeau $s mm^2 = \frac{S}{3(R_r)_e}$, $(R_r)_e$ étant la charge de rupture à l'extension du métal façonné.

MONTAGE DES PIÈCES

Le montage des pièces doit satisfaire aux deux conditions suivantes :

— coïncidence de l'axe de la surface à tourner et de l'axe de la broche du tour;

— entraînement de la pièce en rotation.

Les trois procédés généralement adoptés sont :

— le montage entre pointes;

— le montage en mandrin;

— le montage en plateau.

I. — MONTAGE ENTRE POINTES

A. PRINCIPE (fig. 219).

Deux pointes alignées sur l'axe de la broche reçoivent la pièce qui porte deux centres établis sur l'axe de la surface à obtenir. Pour réaliser l'alignement des pointes sur l'axe de la

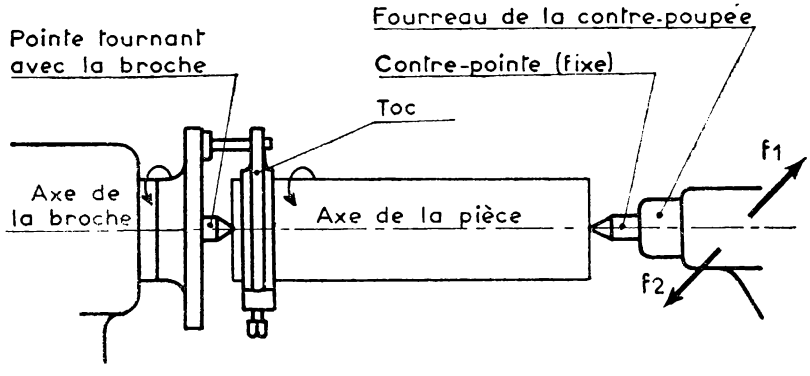


Fig:219- Montage entre pointes.

broche, la contre-poupée est munie d'un dispositif de réglage transversal par glissement suivant f_1 et f_2 du corps de la poupée sur sa semelle. Un toc fixé sur la pièce assure son entraînement par l'intermédiaire du plateau pousse-toc monté sur le nez de la broche.

B. IMPORTANCE DE LA POSITION DES CENTRES.

La coïncidence de l'axe de la broche avec celui de la pièce ne peut être obtenue que si les centres sont eux-mêmes bien alignés. Dans le cas contraire (fig. 220), il y a usure et matage du centre en contact avec la contre-pointe et déportement du centre. Au retournement de la pièce, il en sera de même pour le deuxième centre et les deux parties usinées successivement ne seront pas concentriques. C'est pourquoi il faut ébaucher partiellement chaque partie par retournements successifs pour redresser les centres. Si la contre-pointe est tournante, les centres ne sont plus rodés par frottement, et leur défaut d'alignement est irrémédiable.

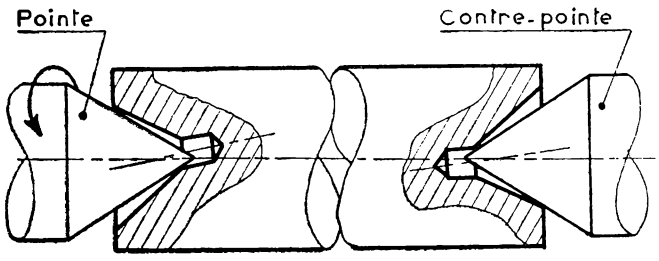


Fig:220- Centres non en ligne. Les pointes portent mal, l'usure des centres est rapide et la pièce ne tourne pas rond.

Il faut donc façonner les centres sur une machines à centrer à deux têtes alignées (fig. 221).

Pour le tournage de précision et pour la rectification entre pointes, l'alignement précis des centres est nécessaire et on l'obtient sur une machine à rectifier les centres (fig. 222). Après rectification, il faut évidemment nettoyer les centres avec soin. La machine est munie d'un dresseur à diamant qui taille la meule avec un angle au sommet de 60°.

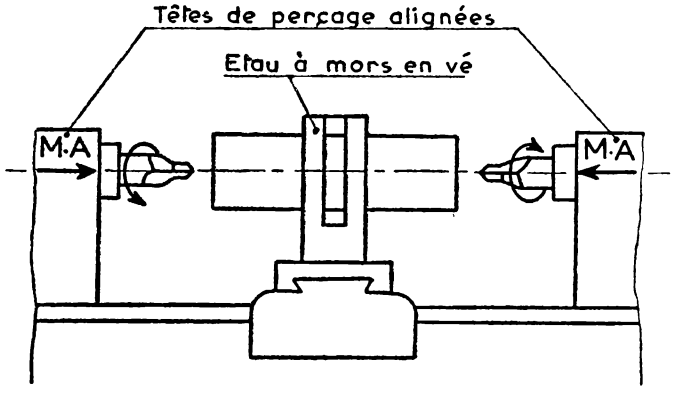


Fig:221- Schéma d'une machine à centrer à deux têtes.

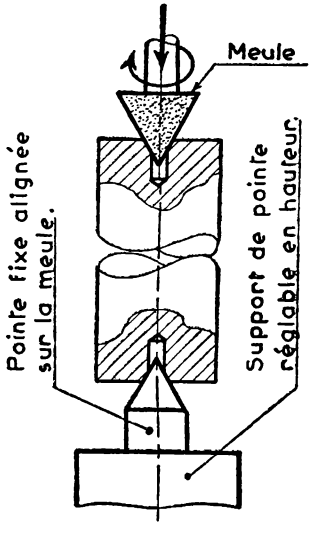


Fig:222- Principe de la rectification des centres.

C. IMPORTANCE DE LA CONCENTRICITÉ DE LA POINTE.

La figure 223 montre une pointe non alignée sur l'axe de la broche. Il s'ensuit que l'axe du centre tournera autour de l'axe de la broche. Au retournement de la pièce, la première partie tournée sera excentrée de **e** et il y aura un faux-rond, ou défaut de concentricité, de 2**e**. Il faut donc nettoyer soigneusement et manipuler avec précaution les pointes de tour.

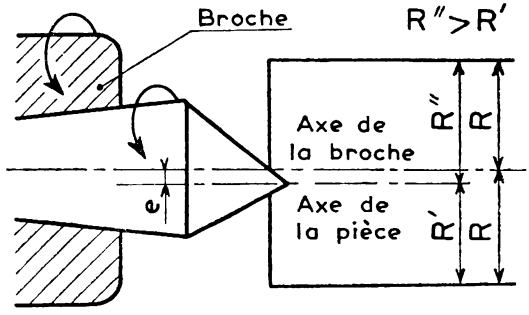


Fig:223- Pointe excentrée.
e : excentration.
2**e** : faux-rond.

D. UTILISATION DES POINTES TOURNANTES.

Le frottement de la pièce sur la contre-pointe provoque, lorsque la durée de l'usinage est importante, la détérioration des centres et le grippage pouvant aller jusqu'à une véritable soudure de la pièce et de la contre-pointe. De plus, la chaleur dégagée au cours du tournage dilate la pièce, ce qui entraîne une forte pression sur les pointes.

La contre-pointe tournante (fig. 224), en substituant le roulement au frottement, élimine pratiquement toute usure du système et admet des poussées longitudinales très importantes. L'emploi des outils en carbures métalliques, en nécessitant des vitesses de coupe élevées, a conduit à l'utilisation presque exclusive des pointes tournantes.

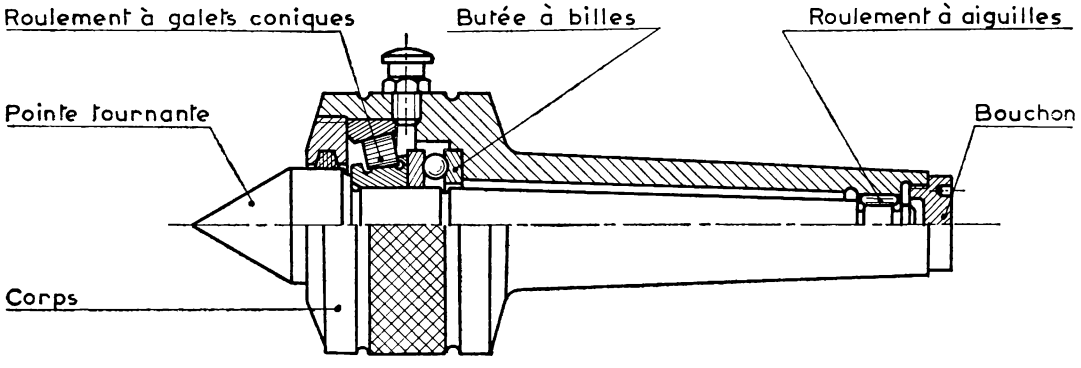


Fig:224- Contre-pointe tournante.

II. — MONTAGE EN MANDRIN A SERRAGE CONCENTRIQUE

Ce mode de montage est généralement employé pour le tournage en l'air des pièces de révolution dont la longueur en porte-à-faux est telle qu'il n'y ait pas à craindre de déformations inacceptables. Ces mandrins sont équipés de mors qui permettent un serrage extérieur ou intérieur indifféremment.

Les mors sont dits **durs** lorsqu'ils sont en acier trempé. Ils sont alors utilisés pour le serrage des pièces brutes ou ébauchées car ils laissent leur empreinte et, de plus, la précision de leur concentricité est insuffisante après un court usage.

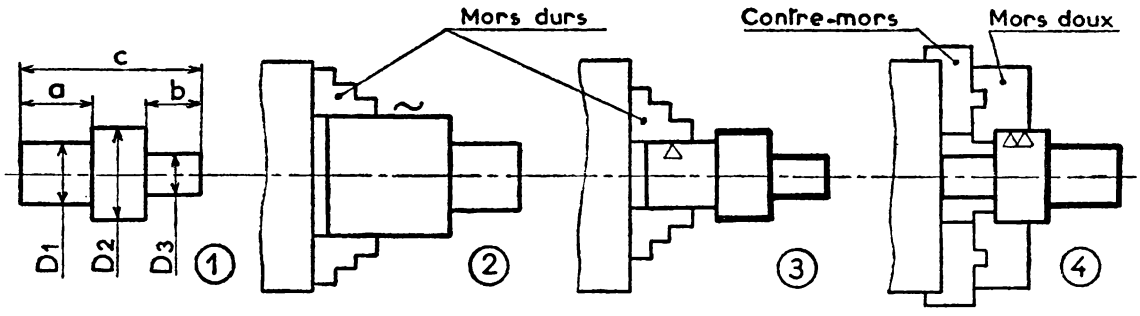


Fig:225- Tournage en mandrin
①:Pièce . ② Ebauche de D1 et de a en mors durs. ③:Ebauche de D2, D3 et b, puis finition en mors durs. ④:Finition de a, de c et de D1 en mors doux.

Les mors sont dits **doux** lorsqu'ils sont en acier mi-dur non traité. Ils sont tournés à chaque emploi à la cote de la pièce et dans les mêmes conditions de serrage que pour leur utilisation (1). La concentricité nécessaire pour la reprise de pièces sur une partie usinée sans la marquer est ainsi assurée.

La figure 225 est un exemple de travail en mors durs, puis en mors doux par serrage extérieur.

La figure 226 est un exemple de travail en mors durs, puis en mors doux par serrage intérieur.

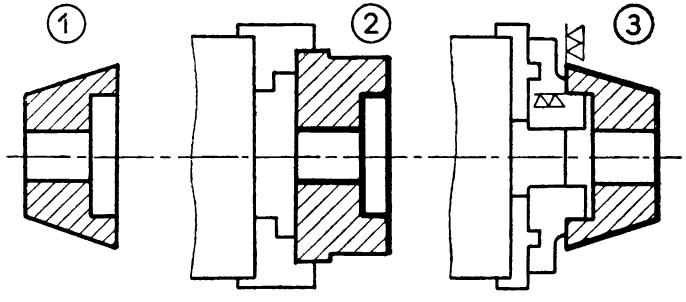


Fig:226- Tournage en mandrin
① Pièce . ② Ebauche et finition du chambrage et de l'alésage en mors durs. ③ Ebauche et finition du cône en mors doux.

Remarque. La partie usinée des mors doux est prévue pour servir de butée à l'enfoncement des pièces.

---

(1) La pratique de ce procédé est étudiée en technologie de spécialité du tournage.

III. — MONTAGE EN PINCE

Les pièces cylindriques de petits et moyens diamètres peuvent être serrées en pince (fig. 227). La surface serrée est toujours une surface usinée à un diamètre égal à celui de la pince.

Les pinces sont très utilisées sur les tours révolvers ou automatiques pour le décolletage de pièces prises dans des barres étirées. Le tirage de la pince s'opère de l'arrière par un système à vis, à leviers ou encore pneumatique.

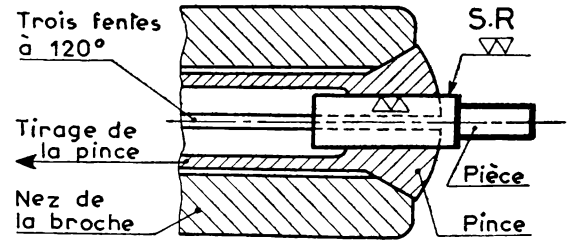


Fig:227- Montage en pince.

IV. — MONTAGE EN PLATEAU

Les pièces de forme quelconque, usinées en l'air, sont montées sur plateau à mors indépendants ou sur plateau à trous.

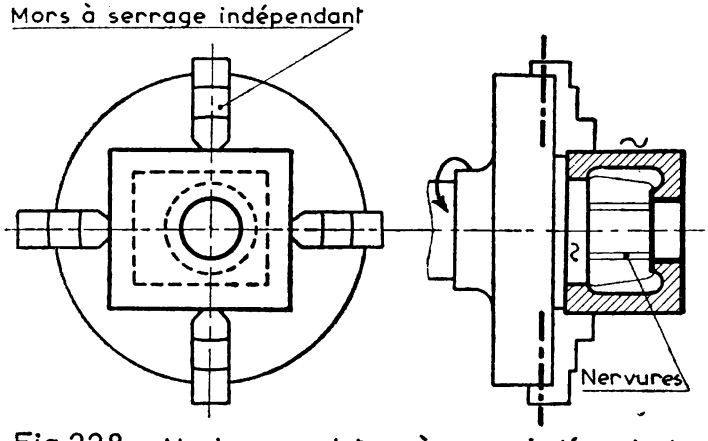


Fig:228- Montage en plateau à mors indépendants.

A. MONTAGE SUR PLATEAU A MORS INDÉPENDANTS.

Les mors sont toujours durs et chacun a son système de serrage particulier.

La figure 228 est un exemple de montage pour pièce brute. Un tracé préalable peut servir de référence pour le centrage de l'alésage. Le parallélisme approché des faces opposées de la pièce peut être contrôlé par un trusquin glissant sur le banc du tour.

B. MONTAGE EN PLATEAU A TROUS.

Le plateau à trous étant une table porte-pièce, le montage et l'ablocage des pièces suivent les règles générales déjà énoncées (1).

Le plateau à trous offre des combinaisons variées, adaptables au montage des pièces de formes très diverses. Une ou plusieurs de leurs faces usinées servent de référence.

---

(1) Revoir « Montage et ablocage des pièces », 26e leçon, cours de Deuxième, et deuxième partie, classe de Première.

La figure 229 illustre un exemple de montage en plateau à trous qui en résume les règles générales. L'étude des différents cas qui dérivent de ce montage type est faite en technologie de spécialité de tournage.

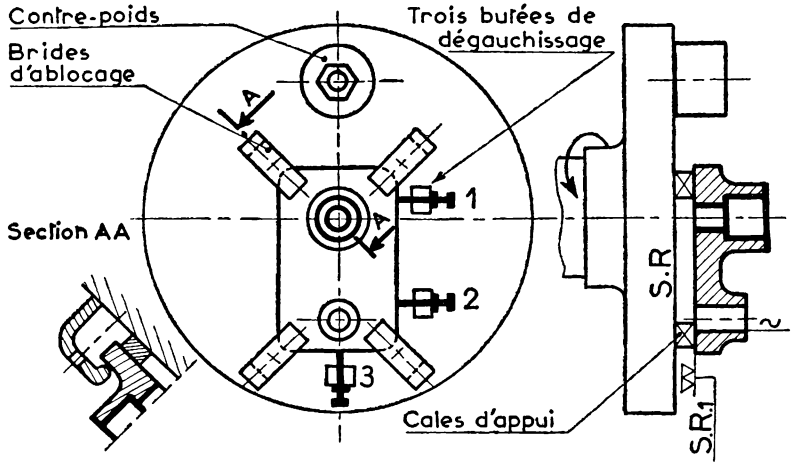


Fig. 229– Montage sur plateau à trous. La pièce a une face de référence perpendiculaire à l'axe de tournage.

Remarque. Sur le plateau à trous, on peut fixer un plateau magnétique à aimantation permanente. Les règles de positionnement sont les mêmes, seules les opérations d'ablocage sont supprimées, ce qui est un gain de temps appréciable.

C. CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DU PLATEAU.

Presque toujours la pièce et ses accessoires de montage entraînent le déséquilibrage du plateau. Il faut donc le rétablir en montant un contre-poids sur le plateau.

1° Équilibre statique (fig. 230-1).

$\mathbf{G_1}$ est le centre de gravité de la partie située à gauche de l'axe vertical du plateau, $\mathbf{G_2}$ le centre de gravité de la partie située à droite de cet axe, $\mathbf{P_1}$ et $\mathbf{P_2}$ sont les poids respectifs de chacune de ces parties.

Si l'on a $\mathbf{P_1 l_1 = P_2 l_2}$, l'équilibre statique est réalisé Le produit $\mathbf{P_1 l_1}$ dépendant du montage adopté, on ne peut satisfaire l'égalité qu'en faisant varier $\mathbf{P_2}$ ou $\mathbf{l_2}$ ou les deux à la fois.

2° Équilibre dynamique (fig. 230-2).

Au cours de la rotation du plateau statiquement équilibré, les masses correspondant à $\mathbf{G_1}$ et $\mathbf{G_2}$ sont sollicitées par les forces centrifuges égales $\mathbf{F_1}$ et $\mathbf{F_2}$. Par rapport au point **O**, milieu du palier avant de la broche, $\mathbf{F_1}$ et $\mathbf{F_2}$ ont des moments inégaux :

$$\mathbf{M_o F_1 > M_o F_2} \quad \text{car} \quad \mathbf{L_1 > L_2}$$

Il en résulte un couple de valeur $(\mathbf{M}_o\mathbf{F}_1 - \mathbf{M}_o\mathbf{F}_2)$ qui tend à fléchir la broche en même temps que $\mathbf{F}_1$ et $\mathbf{F}_2$ tendent à voiler le plateau.

Pour que l'équilibre dynamique soit établi, il faut que $\mathbf{F}_1$ et $\mathbf{F}_2$ soient directement opposées Le centre de gravité du contre-poids doit donc se trouver dans le même plan normal à la broche que le centre de gravité du montage et de la pièce (fig. 231). De plus, pour éviter le voile du plateau, il est bon de lier par des bretelles le contre-poids à l'équerre support de pièce.

Ceci montre que l'équilibrage du plateau doit être étudié et qu'il ne suffit pas de monter un contre-poids quelconque n'importe où.

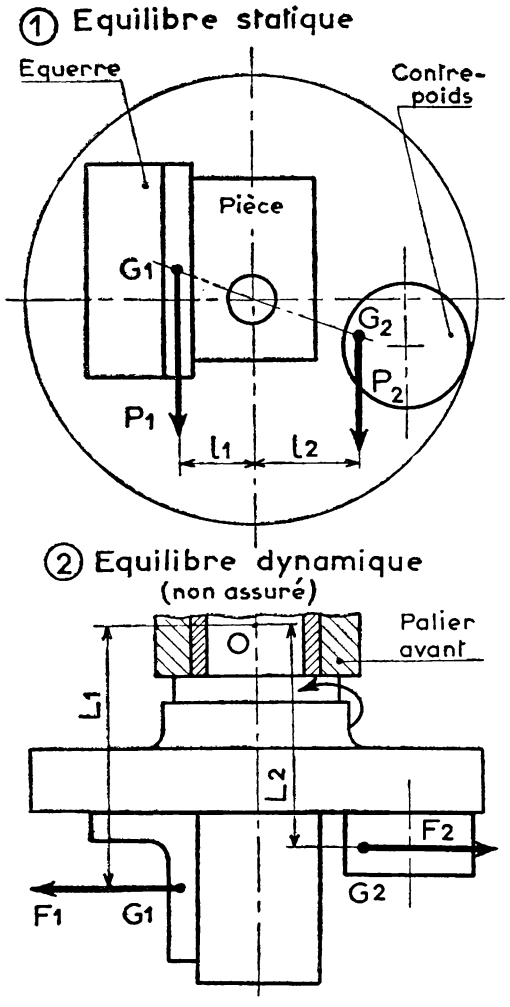


Fig:230-L'équilibre statique du plateau est assuré, l'équilibre dynamique ne l'est pas.

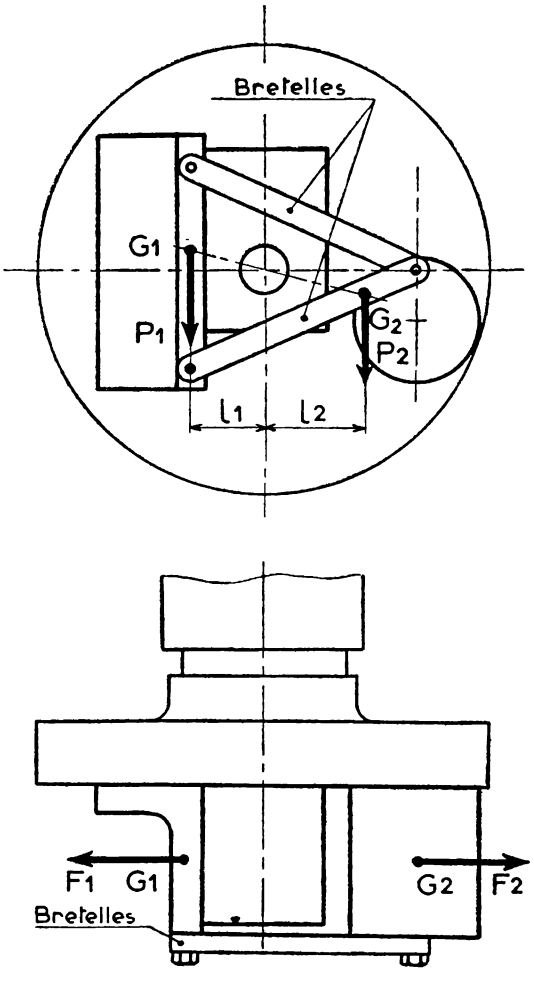


Fig:231- Le plateau est équilibré statiquement et dynamiquement. Les bretelles évitent le voile du plateau.

Nous classerons ici les tours d'après leur conception qui dérive elle-même des travaux auxquels ils sont destinés.

I. — TOUR PARALLÈLE A CHARIOTER

Il ne possède qu'un chariot longitudinal, ou traînard, dont l'avance est commandée par une barre de chariotage. Ordinairement, le tour est équipé d'un seul chariot porte-outil dit chariot avant. Pour augmenter les possibilités du tour, c'est-à-dire en définitive réduire le temps d'usinage, on peut monter un deuxième chariot porte-outil, ou chariot arrière, sur le traînard (fig. 232). Les outils de chaque tourelle travaillent alternativement.

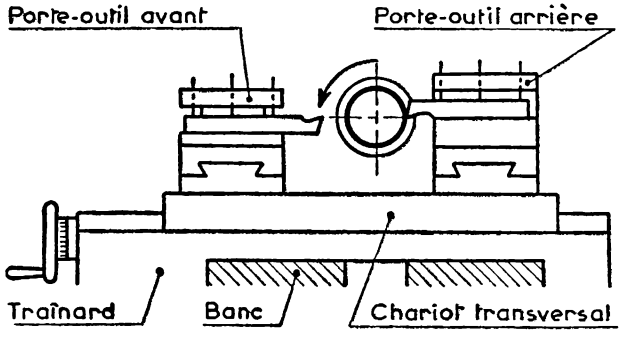


Fig: 232- Tour à charioter à 2 porte-outils.

Les travaux exécutés entre pointes ou en plateau ne comportent pas de filetage.

II. — TOUR PARALLÈLE A CHARIOTER ET A FILETER

C'est un tour parallèle à charioter, mais sur lequel l'avance du traînard peut être obtenue par une **vis-mère** pour l'exécution des filetages. C'est le tour type dit **d'outilleur** (1).

III. — TOUR RÉVOLVER

Le tour parallèle ne permet pas le montage d'un important jeu d'outils préalablement réglés et venant automatiquement en position de travail. Le tour révolver, conçu pour le décolletage et pour l'usinage en série de pièces montées en mandrin, présente une tourelle pivotante qui remplit ces conditions.

A. TOUR RÉVOLVER ORDINAIRE (fig. 233).

Le tour révolver comporte :

— une poupée fixe dont la broche reçoit les dispositifs de montage des pièces : pince ou mandrin ;

— un chariot longitudinal portant une tourelle révolver généralement à six faces, qui reçoit les outils : outils à charioter, à dresser, foret, taraud, filière, alésoir. Les outils et les différents porte-outils auxiliaires y sont fixés par tampons tangents (1).

---

(1) Revoir « Étude fonctionnelle des machines-outils », deuxième partie, classe de Première.

— un chariot transversal sur lequel sont montés un porte-outil avant et un porte-outil arrière pour le travail en plongée : gorge, moletage, travail de forme, tronçonnage.

Lorsque le tour est équipé pour du décolletage, un tube guide-barre prolonge l'arrière de la broche.

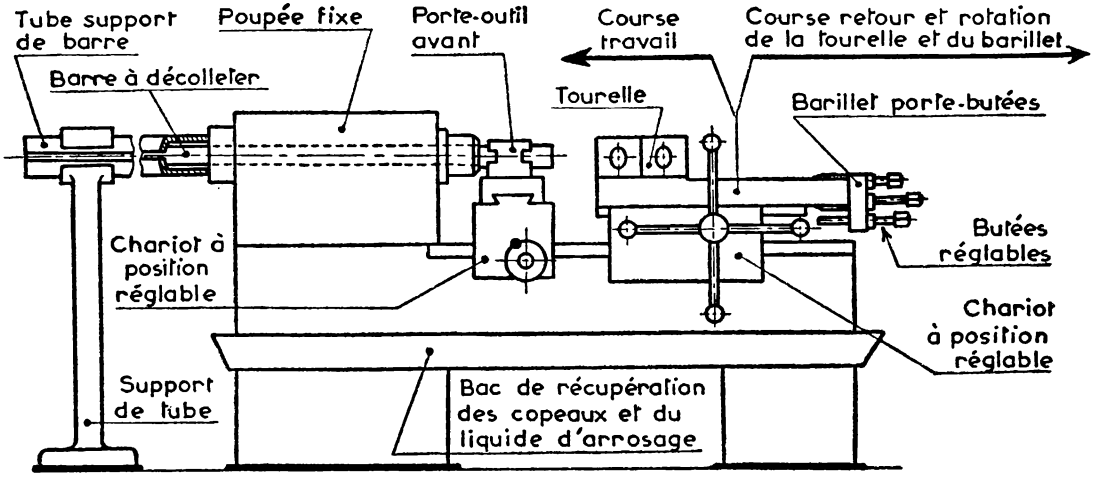


Fig: 233- Tour à tourelle révolver ordinaire.

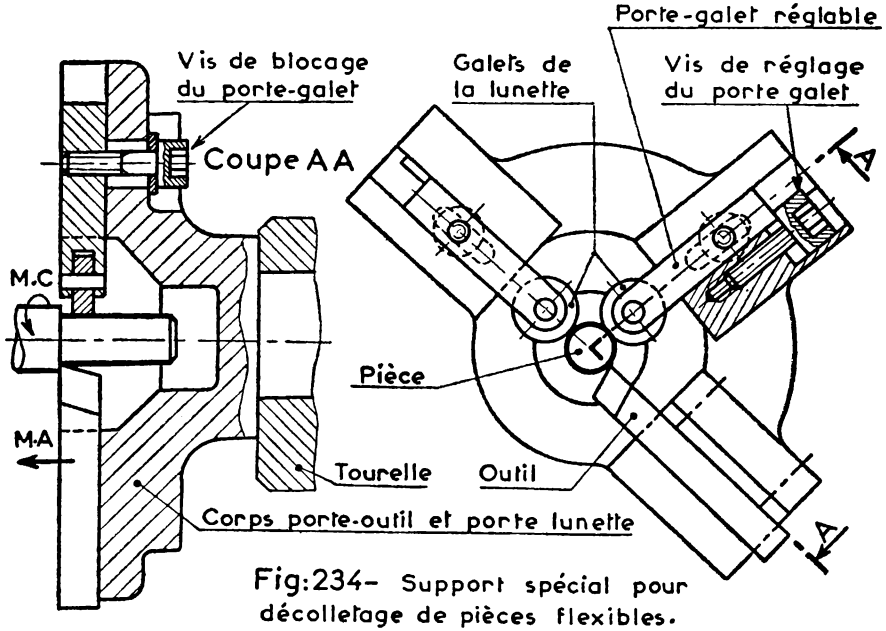


Fig:234- Support spécial pour décolletage de pièces flexibles.

Sur le tour révolver ordinaire, les mouvements de serrage et de desserrage de la pièce ou de la barre, d'avance et de retour des outils, sont manuels.

Après chaque opération et au cours de son retour, la tourelle tourne sur elle-même d'un sixième de tour (si elle est à 6 faces) pour présenter successivement les différents outils qu'elle porte en position de travail. Cette position est maintenue par un verrouillage automatique de la tourelle.

La course des outils est réglée par des vis de butée portées par un barillet monté en bout du chariot porte-tourelle. Ce barillet tourne d'un sixième de tour à chaque rotation correspondante de la tourelle.

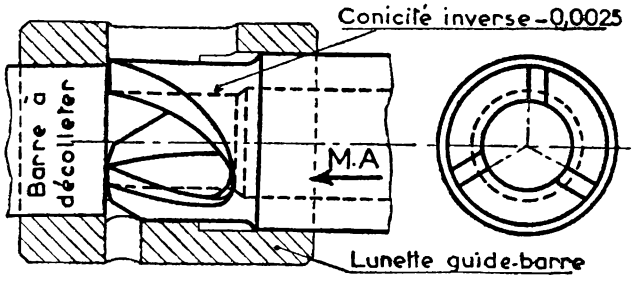


Fig:235- Fraise creuse pour décolletage.

Si le tour produit du décolletage :

— un des outils de la tourelle est remplacé par une butée qui règle la position de la barre à chaque avancement suivant l'exécution d'une pièce ;

— un des outils latéraux est un outil de tronçonnage qui sépare la pièce de la barre après exécution.

Outils pour tour révolver.

Ce sont les mêmes que ceux utilisés sur le tour à charioter. Ils sont montés directement sur la tourelle ou sur des porte-outils auxiliaires spéciaux (1).

Pour le chariotage des pièces flexibles, le porte-outil est muni d'une lunette à galets qui empêche les déformations (Fig. 234).

L'outil à charioter peut être remplacé par une **fraise creuse** (fig. 235) qui permet une précision de l'ordre du centième de millimètre. Elle peut porter une lunette guide-barre qui favorise le travail et qui comporte des **à-jour** correspondant à la taille de la fraise et par lesquels les copeaux peuvent se dégager.

TRAVAUX AU TOUR RÉVOLVER.

1° Travaux de décolletage.

La figure 236 est un exemple de pièce à fabriquer par décolletage. La figure 237 illustre la gamme des huit opérations d'usinage qui suivent l'opération d'alimentation. Au cours de cette première opération, la pince étant desserrée, la barre, sous la poussée d'un contre-poids, avance jusqu'au contact de la butée réglable fixée à la tourelle.

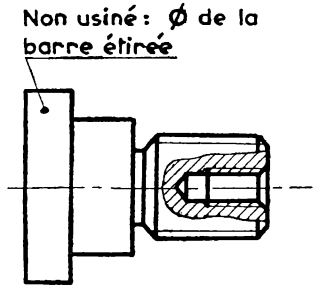


Fig:236- Pièce à décolleter.

(1) Revoir « Étude fonctionnelle des machines-outils », deuxième partie, classe de Première.

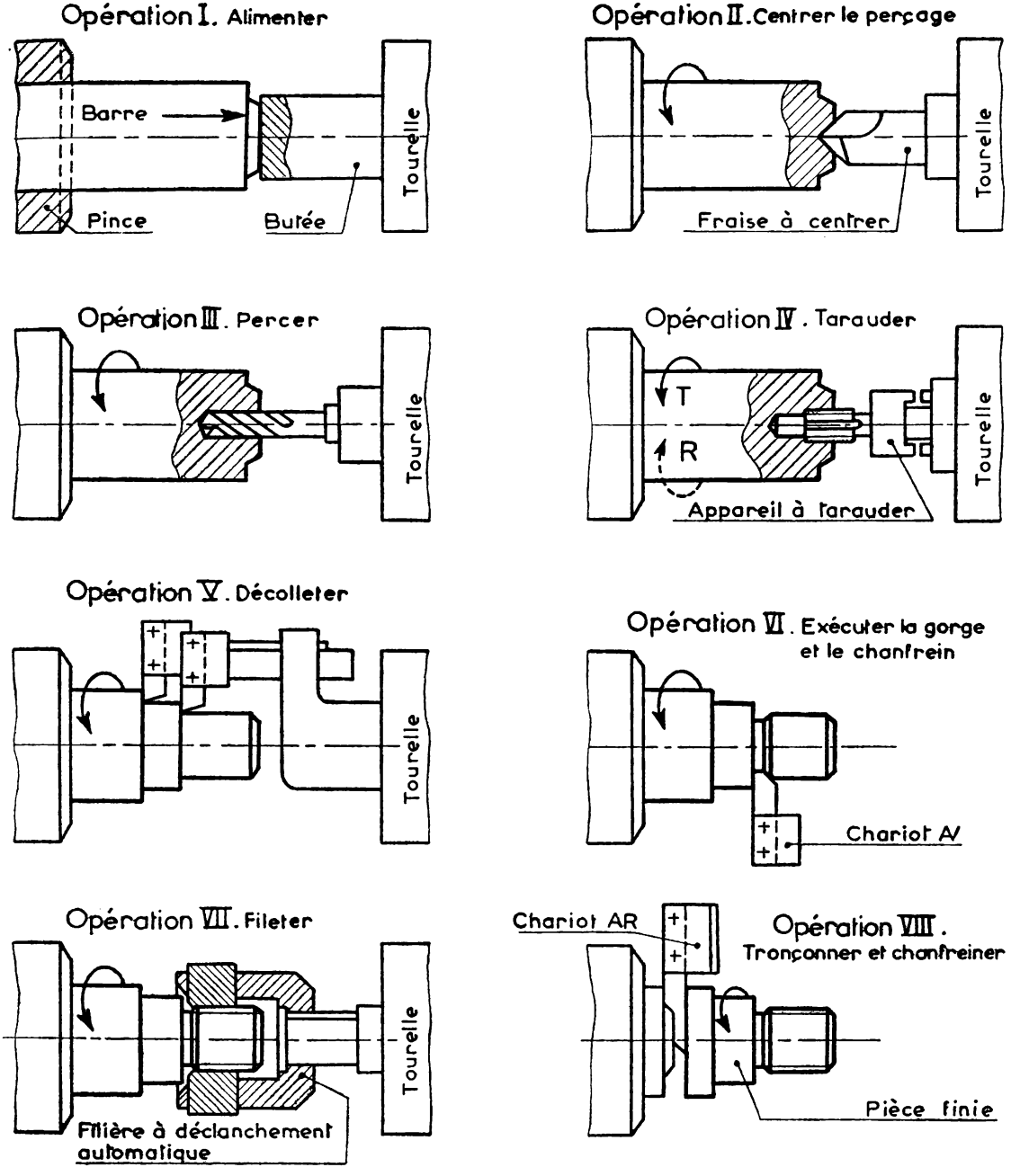


Fig:237- Travaux de décolletage, de perçage, de taraudage et de filetage, au tour révolver ordinaire.

Au cours de l'opération IV, lorsque le taraudage **T** est terminé, c'est l'ouvrier qui inverse le sens de marche de la broche pour obtenir le retour **R** du taraud, puis l'inverse de nouveau pour faire tourner la broche dans le sens de coupe des outils.

2° Travaux en mandrin.

Nous donnons (fig. 238), un exemple de travail en mandrin se rapportant à un tour semi-automatique à tourelle à quatre faces, mais qui pourrait tout aussi bien être réalisé sur un tour révolver en utilisant les six faces de sa tourelle.

B. TOUR SEMI-AUTOMATIQUE.

Sur le tour semi-automatique, une barre de chariotage commande l'avance automatique du chariot porte-tourelle et les mouvements du chariot transversal. Des butées de fin de course débrayent le mécanisme automatique et les mouvements de retour, ainsi que l'ouverture et la fermeture de la pince, ou du mandrin, sont rendus manuels.

La figure 238 est un exemple de travail en mandrin sur tour semi-automatique à tourelle à quatre faces. On remarquera que :

— pour le diamètre **h**8 il y a ébauche au poste I et finition au poste III;

— pour le diamètre **H**6 il y a ébauche au poste I, demi-finition au poste III, puis finition au poste IV.

La précision imposée ne peut en effet être obtenue, comme nous l'avons déjà signalé, qu'en exécutant cette succession de passes de travail. De plus, on observera que pour l'opération I, le porte-outil fixé à la tourelle est supporté et guidé par un support fixé à la poupée fixe. On augmente ainsi la rigidité de l'ensemble chariot porte-tourelle, tourelle et porte-outil et, en évitant les déformations, on peut tenir la précision imposée.

Les outils sont en carbure métallique. Leur longue durée de coupe réduit donc les pertes de temps qu'exigent leur affûtage, leur montage et leur réglage, et la précision du travail est moins sujette aux variations.

C. TOUR AUTOMATIQUE.

Pour supprimer les mouvements manuels, tels qu'ils existent sur le tour révolver et le tour semi-automatique et, par suite, pour éviter la présence constante de l'ouvrier, on a construit des tours où tous les mouvements sont automatiques.

L'automaticité est obtenue par cames, ou par cames et leviers conjugués, ou encore par cames et plans inclinés (1) auxquels sont adjoints parfois des ressorts ou des contrepoids de rappel des chariots.

Le tour automatique a un rendement de production très élevé pour la fabrication de vis, d'axes et de pièces de décolletage courant, mais il peut aussi être équipé pour l'obtention de pièces plus compliquées.

---

(1) Revoir « Étude fonctionnelle des machines-outils », deuxième partie, classe de Première.

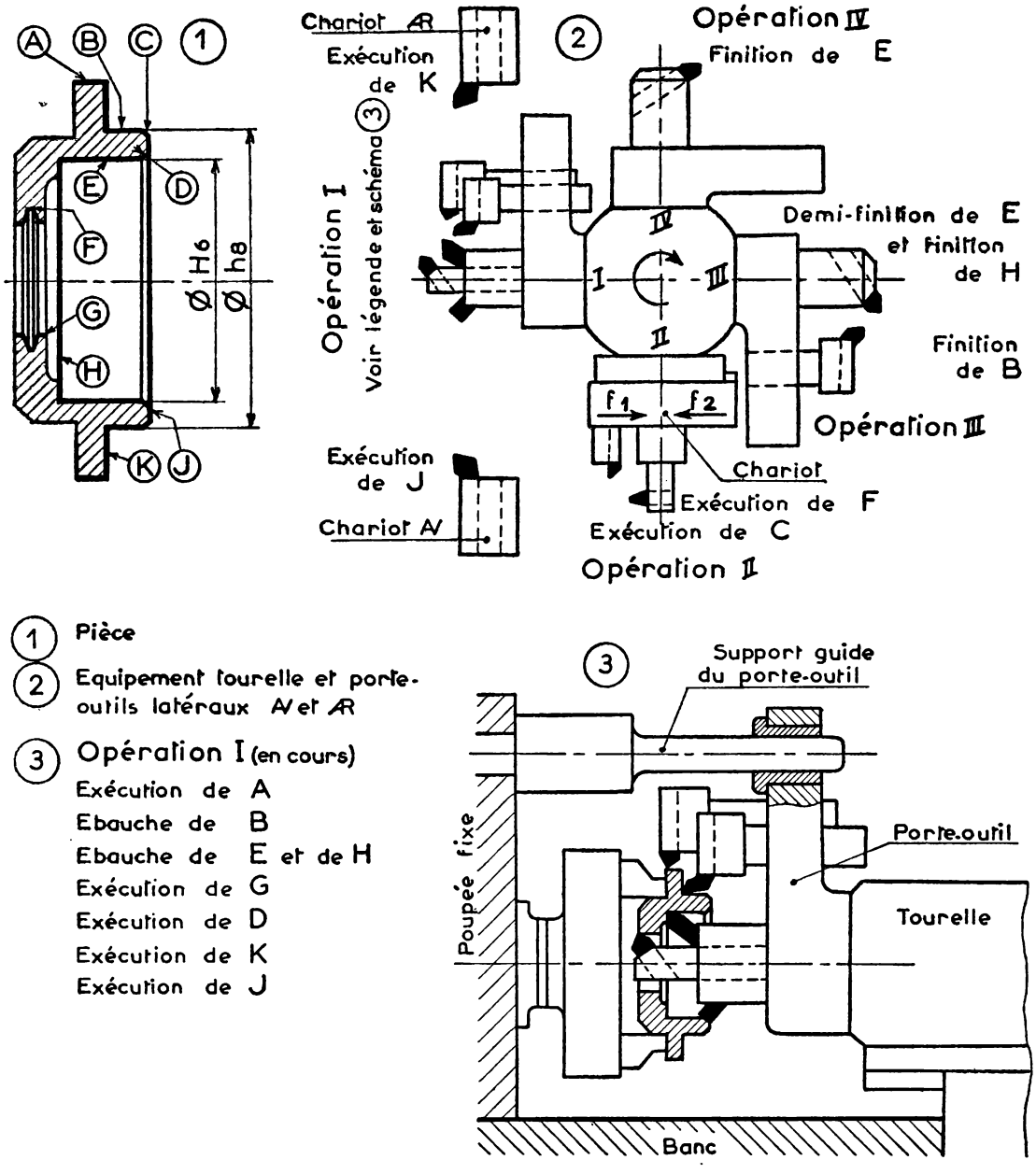


Fig: 238– Gamme de fabrication schématique d'une pièce sur tour semi-automatique.

MODÈLES TYPES DE TOURS AUTOMATIQUES.

1° Tour à poupée fixe et à tourelle révolver.

Dans ses grandes lignes, son allure est celle du tour semi-automatique.

2° Tour monobroche à poupée mobile

La poupée mobile communique le mouvement de rotation et d'avance à la barre.

Les outils sont disposés radialement sur les chariots **I - II - III - IV - V** qui reçoivent le mouvement de profondeur de passe par le jeu de cames et leviers. Sur chacun de ces chariots est monté un porte-outil 1 - 2 - 3 - 4 qui peut être réglé à la profondeur de passe voulue à l'aide d'une vis de réglage micrométrique.

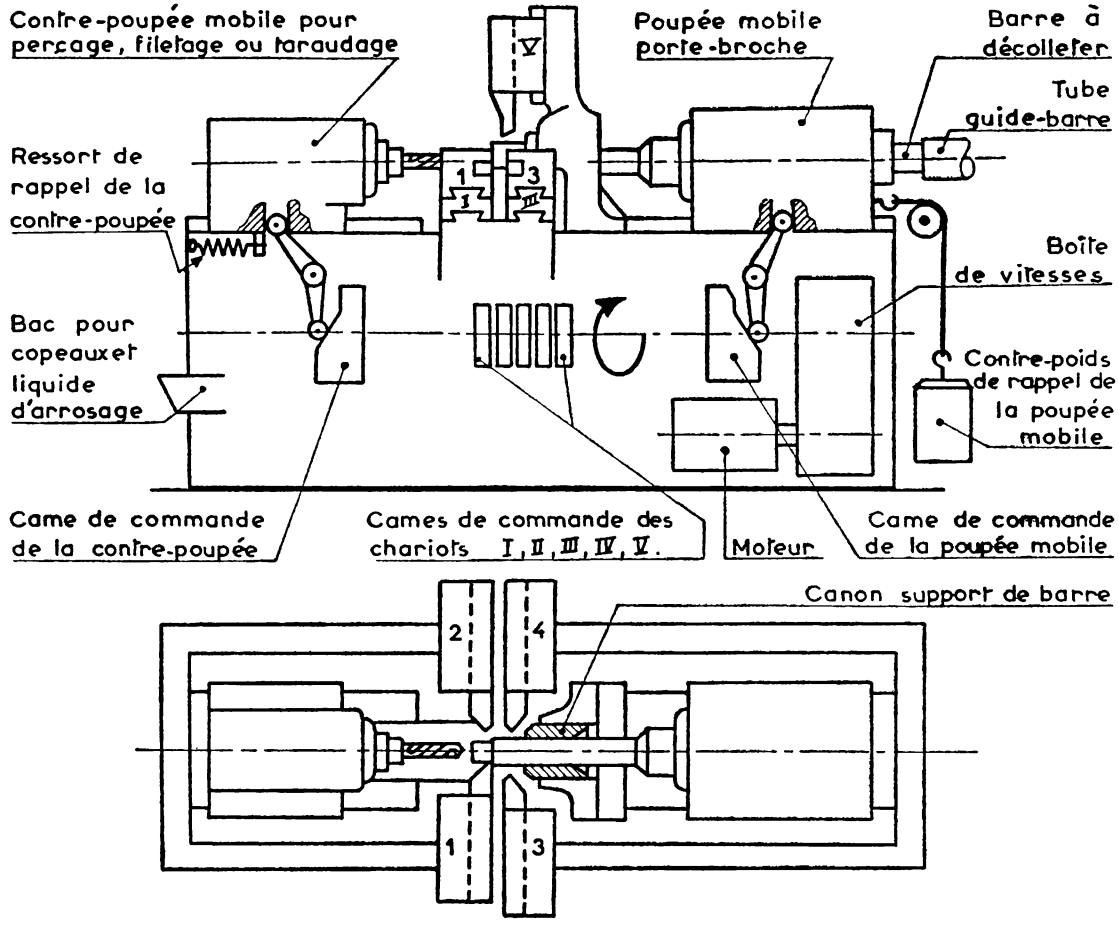


Fig: 239– Tour automatique monobroche à poupée mobile.

Une contre-poupée mobile peut recevoir un foret, un taraud, une filière et parfois un outil qui travaille en bout de pièce.

La figure 240 montre une pièce décolletée sur tour automatique dans l'ordre ci-après :

L'outil V, au cours du tronçonnage de la pièce précédente, laisse la pointe de la partie filetée. Les autres surfaces usinées sont repérées en fonction de l'outil qui les a réalisées.

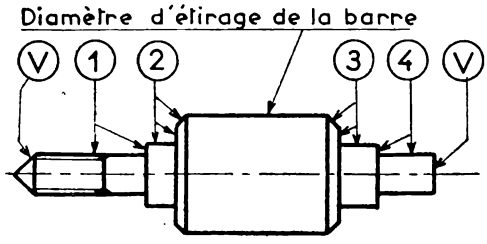


Fig:240- Exemple de pièce usinée au tour automatique.

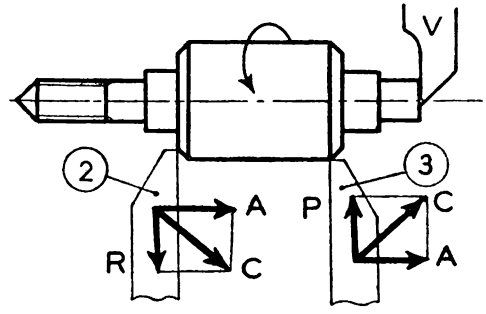


Fig:241- Exécution des chanfreins.

L'exécution des deux chanfreins résulte de la combinaison des deux mouvements rectangulaires des outils 2 et 3 (fig. 241). Ainsi, le premier chanfrein est obtenu par le recul **R** de l'outil 2 simultanément à son avance **A**. La trajectoire de ces deux mouvements, de direction **C**, est parallèle au chanfrein.

Pour le deuxième chanfrein, la trajectoire est la résultante de l'enfoncement **P** de l'outil 3 et de son avance **A**. Lorsque le chanfrein est réalisé, l'avance est arrêtée et l'outil continue sa pénétration radiale.

IV. — TOUR A REPRODUIRE

On désigne sous ce nom un tour où l'outil décrit une trajectoire semblable à celle d'un palpeur-guide auquel il est lié. Le travail est dit **travail de reproduction.**

A. PRINCIPE DE LA REPRODUCTION.

L'outil, toujours orienté dans la même direction, reçoit deux mouvements d'avance combinés.

Ainsi, pour reproduire une surface de révolution à génératrice rectiligne (cas d'un cône, fig. 242-1) ou à génératrice curviligne (fig. 242-2), l'outil reçoit :

— le mouvement $\mathbf{MA}_1$, à vitesse constante, qui provient du dispositif d'avance automatique du tour ;

— le mouvement $\mathbf{MA_2}$ qui provient d'un gabarit reproducteur sur lequel s'appuie le palpeur-guide. Ce mouvement est à vitesse constante si la génératrice est rectiligne ; il est à vitesse variable si la génératrice est curviligne.

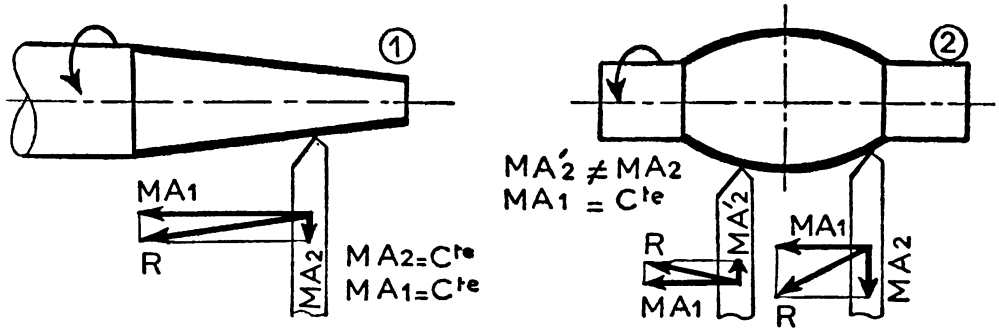


Fig:242- Principe de la reproduction d'une surface de révolution.
①:à génératrice rectiligne ②:à génératrice curviligne.

La résultante **R**, qui est parallèle à la trajectoire de l'outil, est donc :

— de direction et de grandeur constantes dans la reproduction d'un cône par exemple ;

— de direction et de grandeur variables pour la reproduction d'une génératrice curviligne.

Le mouvement $\mathbf{MA_2}$ est provoqué par un dispositif mécanique ou hydraulique (1).

B. REPRODUCTEUR MÉCANIQUE.

1° Reproducteur à galet (fig. 243).

Le chariot transversal, qui ne possède pas de vis de commande, est constamment en contact avec le reproducteur par l'intermédiaire d'un palpeur à galet et d'un ressort d'appui. Le reproducteur n'est autre qu'un gabarit dont la forme dépend de la génératrice de la surface à reproduire.

Le chariot porte-outil est commandé manuellement par vis pour le réglage de la profondeur de passe.

a) Tracé du reproducteur et forme de l'outil (fig. 243).

Sur une plaque d'acier, on trace la génératrice **G** de la surface.

Si on utilise un outil rond, ce qui est généralement le cas, on trace une ligne parallèle extérieure à la première à une distance égale à celle du rayon de l'outil. Cette ligne $\mathbf{L_1}$ est le lieu du centre du bec de l'outil et le lieu du centre du galet. $\mathbf{L_2}$ est identique à $\mathbf{L_1}$.

---

(1) Le travail de reproduction peut se faire à l'outil de forme dans certains cas. Revoir « Étude des outils de forme », classe de Deuxième.

A partir de la ligne L_2, on trace des circonférences de rayon égal à celui du galet. La courbe tangente à ces circonférences est le profil du reproducteur.

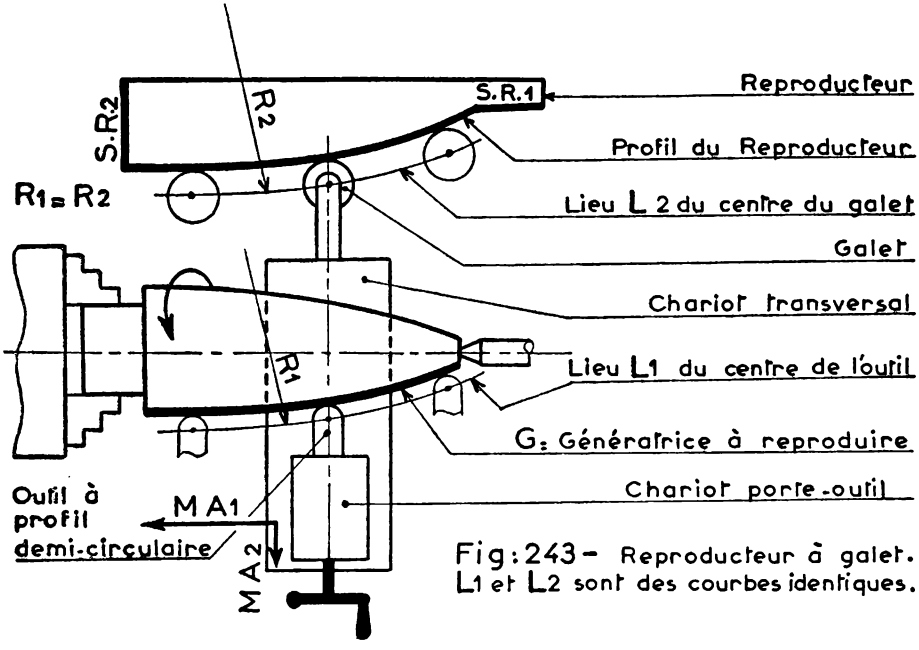


Fig:243 - Reproducteur à galet. L1 et L2 sont des courbes identiques.

Remarques. 1° Si l'outil est à bec pointu, le lieu du centre du galet est identique à la génératrice de la surface.

2° Si au lieu d'un galet on fait usage d'un palpeur glissant (fig. 244), l'outil doit avoir même ouverture et même rayon **R** que le palpeur.

3° Si la génératrice de la surface

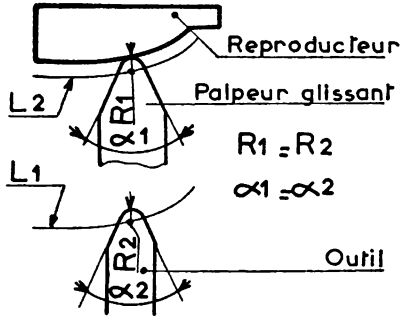


Fig:244 - Palpeur glissant.

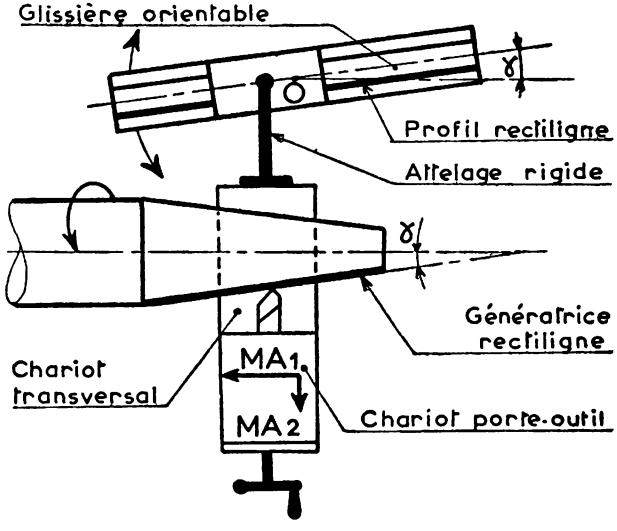


Fig:245 - Appareil à tourner conique.

est une droite, le profil du reproducteur est rectiligne. S'il est incliné sur l'axe de la broche, la pièce usinée sera un cône (fig. 245). Le repropucteur est alors une glissière pivotante, réglée en inclinaison, construite une fois pour toutes, sur laquelle glisse un coulisseau qui joue le rôle de palpeur.

b) Réglage du reproducteur et de l'outil.

Le gabarit reproducteur est positionné de telle sorte que sa surface de référence $\mathbf{SR_1}$ soit parallèle à l'axe de la pièce, c'est-à-dire à l'axe de la broche (fig. 243).

Quelle que soit la position de l'outil par rapport au galet, la génératrice de la pièce sera toujours conforme au tracé initial, puisque la distance $\mathbf{C_1C_2}$ entre le centre du bec de l'outil et le centre du galet est invariable. Il faut cependant, en cas de décalage latéral de ces centres (fig. 246), placer le gabarit reproducteur de telle sorte que sa surface de référence $\mathbf{SR_2}$ soit dirigée vers le centre du galet lorsque le centre de l'outil est contenu dans la face correspondante de la pièce.

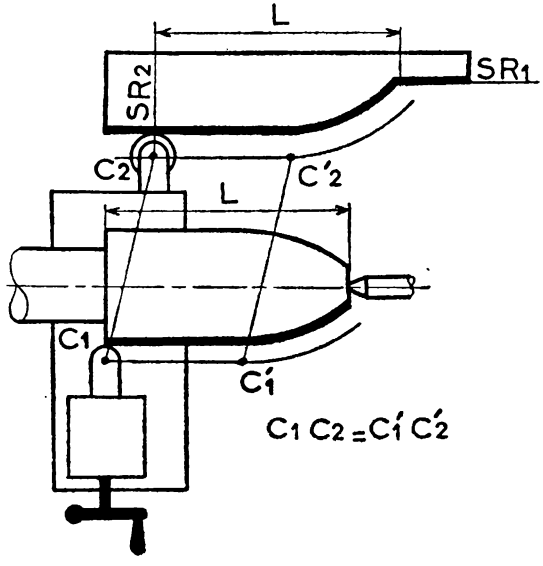


Fig: 246– La distance C1 C2 étant invariable, la génératrice de la pièce est conforme au tracé initial.

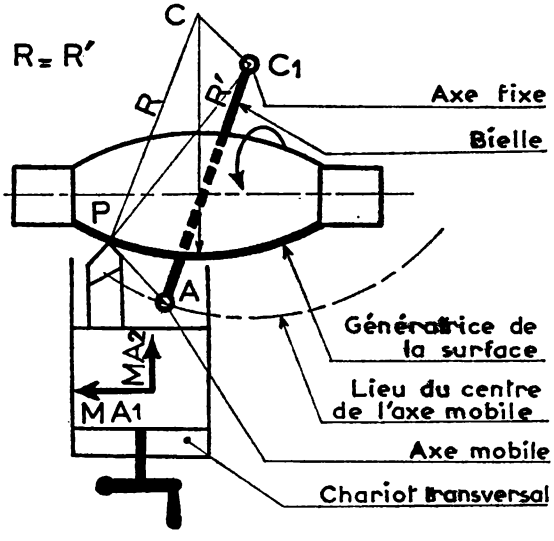


Fig:247– Travail de reproduction par bielle.

2° Reproducteur à bielle.

Lorsque la génératrice de la surface est un cercle, la reproduction peut être assurée par une bielle (fig. 247) qui relie le chariot transversal à un axe fixe solidaire du banc. La bielle a une longueur égale au rayon de courbure de la génératrice.

La figure 247 montre en effet que le triangle $\mathbf{AC_1P}$ a deux côtés invariables, $\mathbf{AC_1}$ longueur de la bielle et $\mathbf{AP}$ lié à la position de l'outil, et un côté variable $\mathbf{PC_1}$ lorsque $\mathbf{A}$ tourne autour de

C_1 qui est fixe. Si on considère le point **C** fictif tel que la figure **PAC$_1$C** soit un parallélogramme, le point **C** sera le centre fixe de la génératrice circulaire de rayon **CP** = **C$_1$A** de la pièce à tourner.

Critique des reproducteurs mécaniques.

Les systèmes de reproduction mécaniques sont de construction simple, mais ils présentent les inconvénients suivants :

— la pression d'appui élevée du palpeur provoque une usure assez rapide du gabarit, surtout si le palpeur est glissant. Il s'ensuit une déformation de son profil ;

— on ne peut reproduire des formes dont la génératrice est très inclinée sur l'axe de la pièce, car il y a arc-boutement du chariot transversal sur sa glissière et le mouvement de recul **MA$_2$** ne peut avoir lieu (fig. 248). On ne peut donc pas reproduire des épaulements à angle droit ni même pratiquement d'inclinaison supérieure à 70° ;

— la commande est *dure*, car elle est directe, ce qui engendre parfois des vibrations ou des ressauts qui se reproduisent sur la surface usinée.

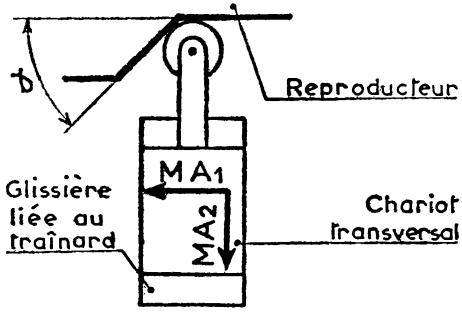


Fig:248 – Il y a arc-boutement du chariot transversal sur sa glissière lorsque α est trop grand.

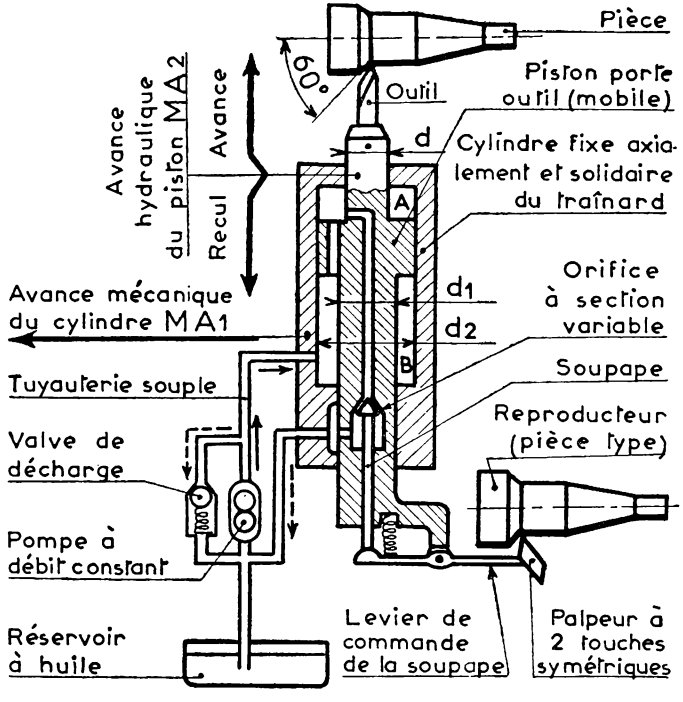


Fig:249 – Principe de l'appareil à reproduire hydraulique "G.F." ($d<d_1<d_2$)

C. REPRODUCTEUR HYDRAULIQUE.

Pour avoir une commande plus souple et une pression du palpeur plus faible, on a substitué au reproducteur mécanique un reproducteur hydraulique (fig. 249). Son principe de fonctionnement est le suivant :

Un piston à double effet reçoit de l'huile sous pression par une pompe à débit constant. Le cylindre est fixe et solidaire du traînard qui lui communique mécaniquement l'avance $\mathbf{MA_1}$.

Lorsque la soupape est suffisamment ouverte pour ne pas freiner le retour de l'huile, le piston, qui porte l'outil, avance car la poussée est plus forte dans la chambre **B** que dans la chambre **A**. Si la soupape se ferme, la poussée est plus grande en **A** qu'en **B** et le piston recule. Il y a donc, pour une certaine ouverture de la soupape, équilibre entre les chambres **A** et **B** et le piston est immobile. Cette position du piston est celle qui assure le cylindrage.

Selon que le palpeur rencontre une rampe montante ou descendante du gabarit, il s'ensuit un déplacement correspondant du piston, donc de l'outil.

Le gabarit est remplacé par une pièce type pour la reproduction extérieure.

La profondeur de passe est réglée en agissant manuellement sur la vis de commande du transversal.

Lorsque l'inclinaison de la génératrice est $\leqslant 60^o$, la reproduction est possible. Au-dessus de 60^o il y a arc-boutement du palpeur sur le gabarit.

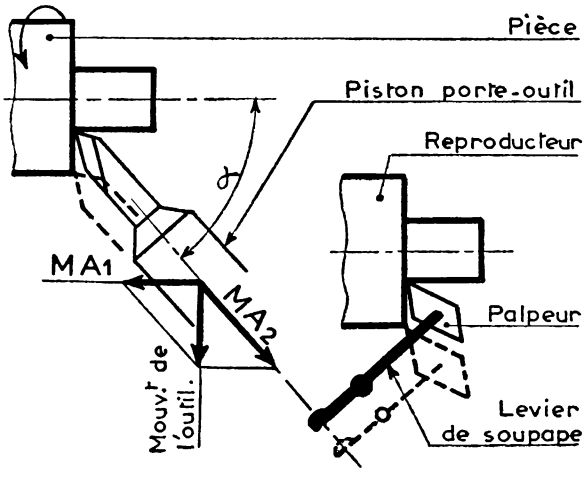


Fig:250- Principe de la réalisation d'un épaulement droit remonté.

Exécution d'un épaulement à angle droit.

Pour atteindre ce but, le système est monté pivotant sur le transversal, ce qui permet de lui donner une position oblique par rapport à l'axe de la pièce (fig. 250). Tant que l'angle α reste $\leqslant 60^o$, le palpeur peut glisser suivant une ligne perpendiculaire à l'axe de la pièce en s'éloignant de cet axe, ce qui provoque le mouvement $\mathbf{MA_2}$ du piston. Ce mouvement, conjugué à celui $\mathbf{MA_1}$ provenant du transversal, entraîne un recul de l'outil normal à l'axe de la pièce. On réalise ainsi un **épaulement droit remonté.**

La position oblique de l'appareil ne l'empêche nullement de réaliser des cylindres ou des cônes. C'est d'ailleurs cette position qu'il occupe le plus souvent.

EXEMPLES DE PIÈCES RÉALISÉES AU REPRODUCTEUR HYDRAULIQUE

Le travail au reproducteur hydraulique, appelé **copiage** — le tour s'appelant **tour à copier** — favorise la production. Il faut cependant adopter certaines formes de pièces qui facilitent leur réalisation. Nous signalerons les principales dans les exemples suivants.

1er Ex. : La pièce figure 251 présente des **diamètres qui vont en augmentant** jusqu'au point 2. Il est possible de remonter les épaulements droits et l'épaulement oblique 1-2. Les gorges

sont pratiquées par des outils de forme montés sur des chariots indépendants manœuvrés à la main. La partie oblique 2-3 est descendue par l'outil du reproducteur. La valeur de 30° est la valeur maximum de son inclinaison dans ce cas. Une butée limite la fin de course de l'outil et déclenche le système qui commande son retour rapide.

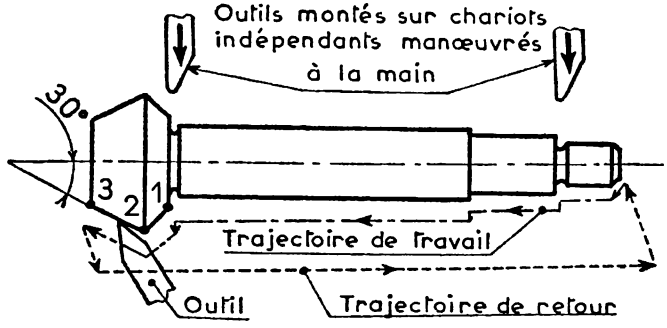


Fig:251– Exemple de pièce usinée sur tour à copier.

2e **Ex.** : La figure 252 représente une pièce qui doit être usinée en deux opérations.

— 1re **opération** : la pièce occupe sur le tour la position indiquée par la figure.

— 2e **opération** : la pièce est retournée parce qu'il est impossible de descendre des épaulements droits. La gorge est réalisée par un outil de forme indépendant.

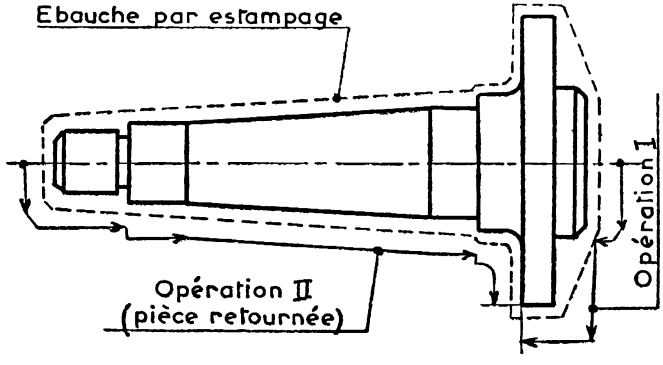


Fig:252– Exemple de pièce usinée en deux opérations.

3e **Ex.** : L'influence des formes (fig. 252) et de leur ébauche (fig. 253 et 254) se manifeste sur les épaisseurs du copeau. Il faut, autant que possible éviter des épaisseurs de copeau trop différentes qui nécessitent des efforts de coupe très variables et provoquent des déformations par fléchissement des pièces.

4e Ex. : Le copiage intérieur ne présente pas plus de difficultés que le copiage extérieur (fig. 255).

Le piston porte-outil supporte une tourelle permettant le montage d'un outil à grain. La pièce type est remplacée par un gabarit.

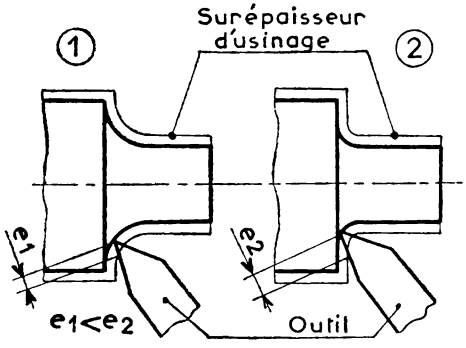


Fig:253– Le congé (1) est préférable au congé (2) car l'épaisseur e1 est plus petite que l'épaisseur e_2.

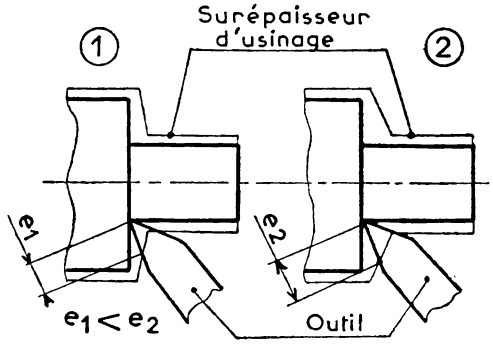


Fig:254– L'ébauche (1) est préférable à l'ébauche (2) car l'épaisseur e1 est plus petite que l'épaisseur e_2.

Si les diamètres vont en diminuant, cas de la figure, le travail est fait en une seule opération.

Si les diamètres décroissants sont suivis de diamètres croissants, il faut deux outils et deux gabarits utilisés alternativement. Même dans ce cas, le copiage est plus économique que les autres procédés de tournage.

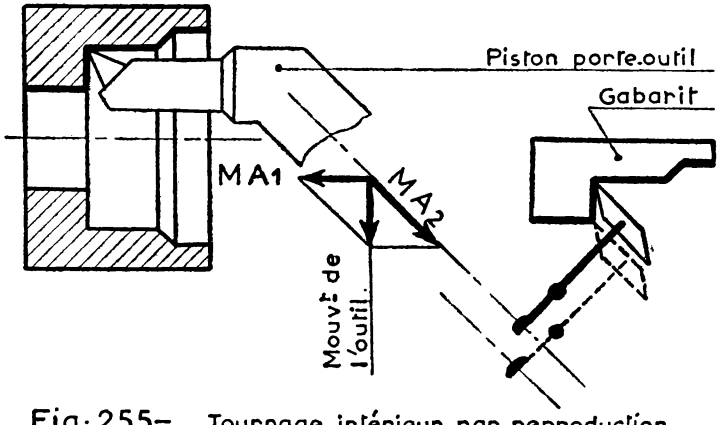


Fig: 255– Tournage intérieur par reproduction.

D. REPRODUCTEUR MÉCANIQUE TOURNANT (fig. 256).

Le reproducteur à la forme et aux cotes demandées, est monté entre pointes et porte une roue dentée de Z_B dents. La roue motrice, montée sur la broche, a même nombre de dents Z_B.

La liaison est réalisée par chaîne. Le reproducteur et la pièce tournent donc à la même vitesse.

Ce système de reproduction, appelé aussi copiage, permet l'usinage de pièces de forme polygonale, elliptique, ainsi que des gravures aussi bien intérieures qu'extérieures. Il est très utilisé pour la fabrication des moules métalliques et des matrices d'estampage.

V. — TOUR VERTICAL

La figure 257 illustre deux types de travaux réalisés au tour vertical pour l'usinage d'un volant. Une opération de surfaçage plan — 1 : le dressage d'une face du moyeu et d'une face de la jante sont simultanés. Il en est de même en 2 pour l'alésage du moyeu et le cylindrage de la jante.

La figure montre que l'ablocage du volant sur le plateau peut se faire :

— soit par serrage intérieur sur la jante à l'aide de mors indépendants dont le plateau est équipé ;

— soit par brides et boulons passant entre les bras du volant et serrés modérément en raison des déformations qu'ils pourraient provoquer.

Des cales réglables empêcheront le fléchissement des bras et l'enfoncement du moyeu sous les efforts de coupe.

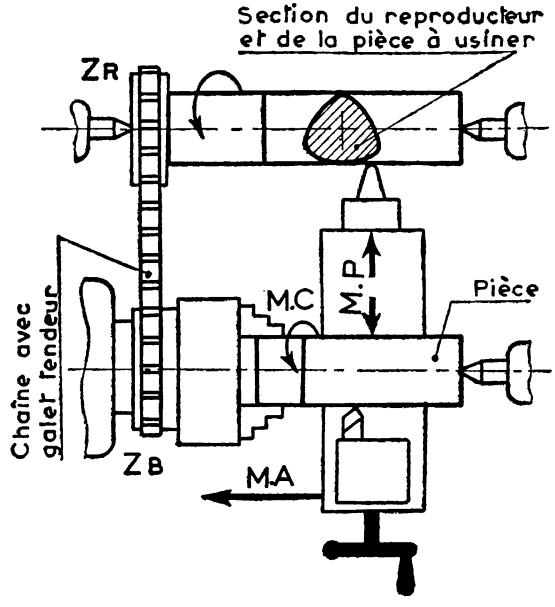
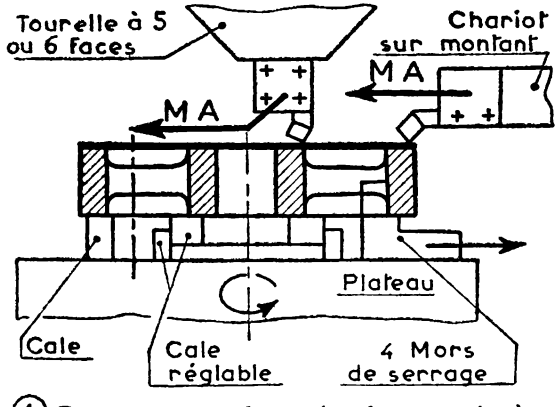
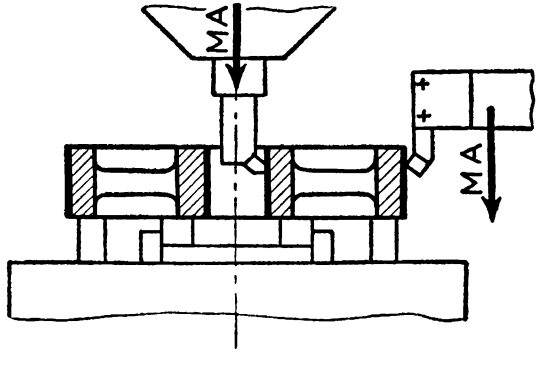


Fig:256 – Copiage au gabarit tournant d'un arbre polygonal.



① Tournage des faces (surfaçage plan)



② Cylindrage de la jante et alésage du moyeu.

Fig:257 – Travaux réalisés au tour vertical.

LES TRAVAUX DE RAINURAGE

Une rainure est un sillon de section constante creusé à l'extérieur ou à l'intérieur d'une pièce et suivant une génératrice le plus souvent rectiligne, parfois hélicoïdale.

Les principaux organes mécaniques rainés sont : les arbres, les alésages, les barres de commande, les tables des machines-outils, certaines cames.

Les travaux de rainurage s'exécutant par rabotage, fraisage ou brochage, et ces opérations d'usinage ayant été étudiées, nous nous bornerons seulement à traiter leurs différentes méthodes d'exécution.

I. — RAINURAGE PAR FRAISAGE

A. RAINURES EXTÉRIEURES

1° Rainures à section rectangulaire.

On peut les obtenir par fraise trois tailles (fig. 258-1) ou par fraise à deux lèvres (fig. 258-2). La fraise trois tailles est remplacée par une fraise scie pour les rainures étroites et la fraise à deux lèvres par une fraise à deux tailles pour les rainures larges.

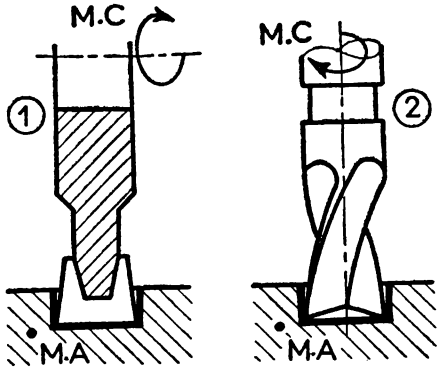


Fig:258-Rainurage par fraisage.
(1) A la fraise 3 tailles.
(2) A la fraise 2 lèvres.

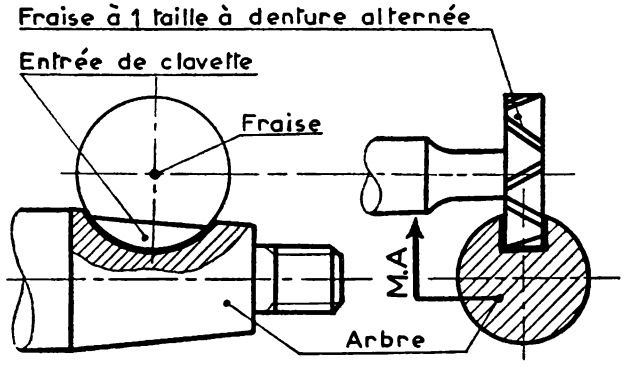


Fig: 259- Rainurage par fraisage d'une entrée de clavette disque.

Les rainures à fond cylindrique (rainures pour clavettes disques dites clavettes Woodruff) sont obtenues avec une fraise disque spéciale (fig. 259).

2° Rainures en T.

L'usinage de ces rainures, lorsqu'elles sont relativement courtes, est réalisé en deux opérations (fig. 260).

1re **opération.** Exécution de la rainure simple.

2e **opération.** Exécution de la branche du **T** avec la fraise à **T**.

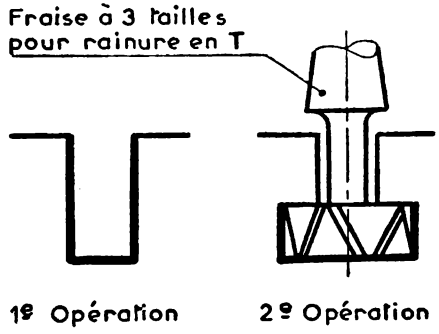


Fig:260- Fraisage d'une rainure en T.

3° Cannelures des arbres.

L'arbre est monté dans un diviseur. La fraise est à profil constant. On peut tailler alternativement chaque cannelure (fig. 261-1). Mais le nombre de cannelures étant pair, 6, 8, 10 ou 16 (voir NF E 22 131), il est également possible de tailler simultanément deux cannelures (fig. 261-2).

La taille des arbres cannelés peut être faite par génération. Ce procédé est traité au chapitre : Travaux de taillage.

4° Rainures hélicoïdales.

Les rainures hélicoïdales extérieures peuvent être obtenues au tour ou à la fraiseuse. La fraiseuse, grâce au diviseur relié à la table qu'elle peut recevoir, est la machine la plus apte à ce genre de travail.

La figure 262 est le schéma de réalisation à la fraiseuse d'une rampe hélicoïdale positive de came tambour.

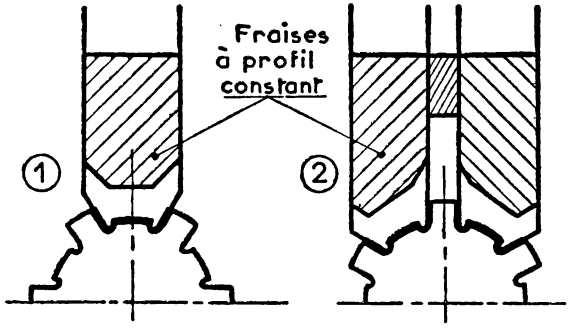


Fig:261- Taillage par fraisage d'un arbre cannelé.
(1) Taillage alternatif.
(2) Taillage simultané.

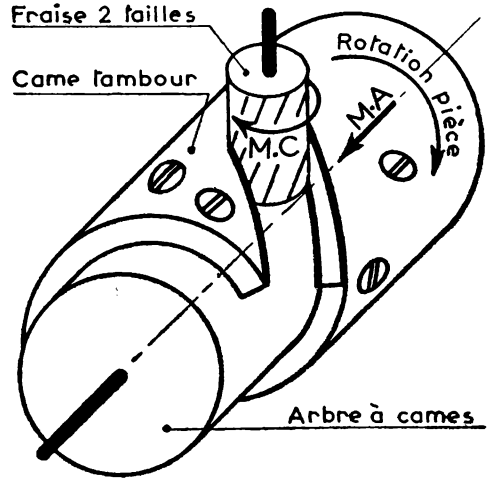


Fig:262- Taillage d'une rainure hélicoïdale de came tambour.

B. RAINURES INTÉRIEURES (fig. 263).

Par fraisage, on ne peut rainer que des alésages de grand diamètre sur une grande longueur. Une barre qui pénètre dans l'alésage porte la fraise et son dispositif d'entraînement.

Ce procédé est principalement appliqué pour rayer les tubes de canons.

II. — RAINURAGE PAR RABOTAGE

A. RAINURES EXTÉRIEURES

1° Rainures à section rectangulaire.

Selon leur disposition sur l'organe à rainer et sa grandeur on les exécute soit à la mortaiseuse, soit à la raboteuse, avec un outil à trajectoire élastique dégageante (fig. 264). A l'étau-limeur et à la raboteuse, les longueurs d'échappées de l'outil seront plus grandes que pour le rabotage ordinaire car il faut relever l'outil au-dessus du plan supérieur pour qu'il ne frotte pas dans la rainure pendant son retour.

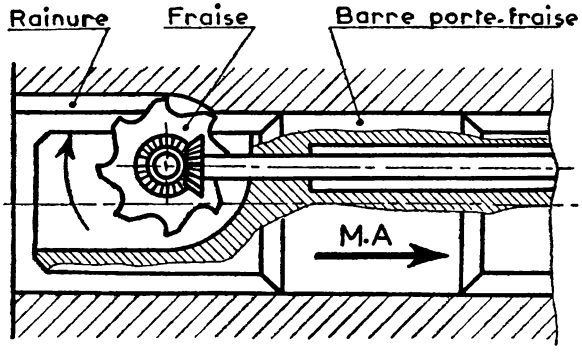


Fig:263- Rainurage intérieur par fraisage.

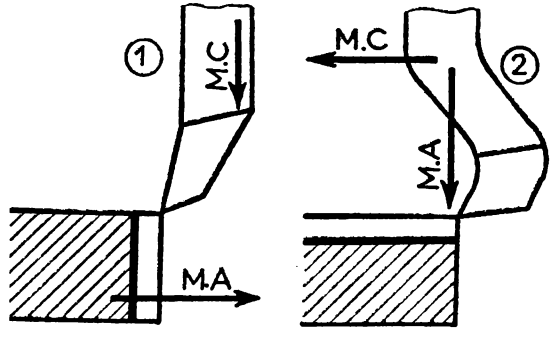


Fig:264- Rainurage extérieur par rabotage
(1) A la mortaiseuse.
(2) A l'étau-limeur.

Les flancs peuvent être finis par planage à l'outil couteau par exemple pour présenter un meilleur état de surface.

2° Rainures en T.

Nous avons vu (fig. 260) que les rainures en **T** courtes sont façonnées par fraisage. Pour les grandes longueurs, on a recours à la raboteuse et le travail est réalisé en cinq opérations au moins (fig. 265).

1re opération. Descendre une rainure ordinaire à l'outil à saigner.

2e opération. Exécuter une demi-branche du **T** avec un outil spécial dont la grande largeur **H** compense la faible épaisseur **E** pour maintenir la rigidité nécessaire. On doit avoir $\mathbf{l < a}$.

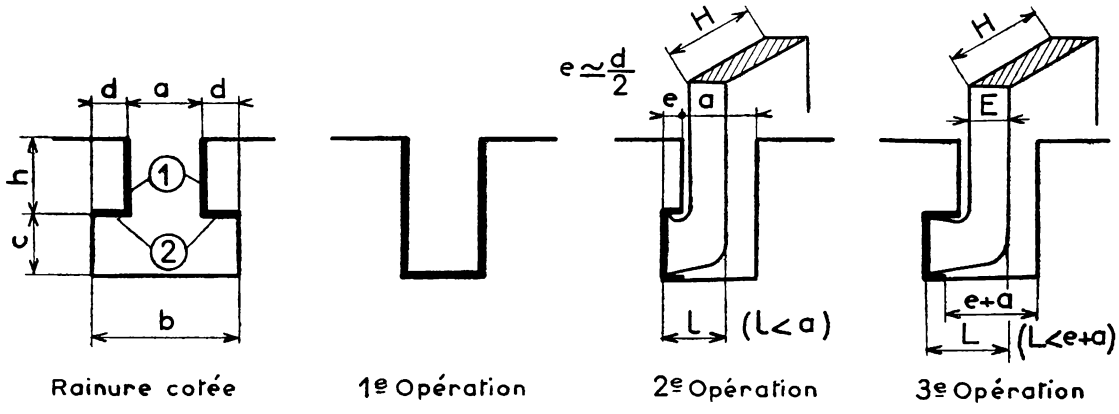


Fig:265– Opérations de rabotage d'une rainure en T.

3e opération. Terminer la branche du **T** avec un deuxième outil spécial pour lequel $\mathbf{L < e + a}$.

4e et 5e opérations. Exécuter la deuxième branche du **T** avec deux outils symétriques des précédents.

Lorsque l'on veut obtenir une face fonctionnelle 2 (fig. 265) de meilleure qualité que celle laissée par les outils spéciaux coudés, une finition par planage est nécessaire (fig. 266). L'outil, spécialement conçu à cet effet, doit être situé en arrière de la verticale **x** qui passe par le centre d'articulation du battant. Ceci pour lui permettre de s'effacer pendant son retour. Un ressort de rappel maintient, le cas échéant, le contact du battant contre son support au moment de l'engagement de l'outil.

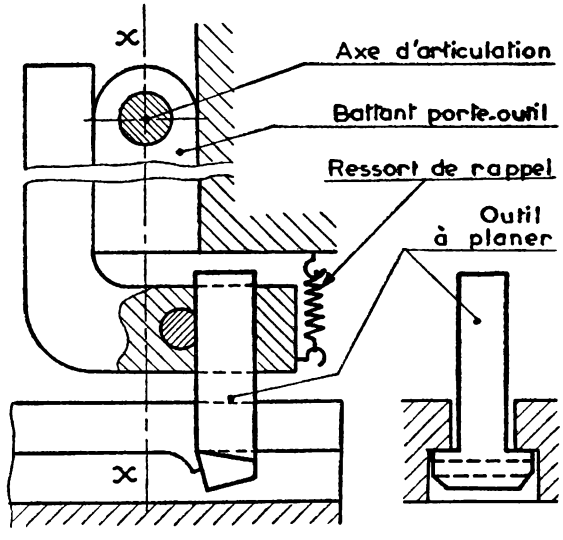


Fig:266– Planage d'une rainure en T.

B. RAINURES INTÉRIEURES (fig. 267).

C'est la mortaiseuse qui présente le plus de souplesse et de commodité pour le rainurage intérieur. En plus de sa table

à deux déplacements rectangulaires, elle peut recevoir un plateau circulaire diviseur qui permet l'exécution de rainures multiples.

La réalisation de contours composés d'éléments rectilignes ou courbes qu'on trouve souvent dans les matrices de découpage et d'emboutissage y est toujours possible.

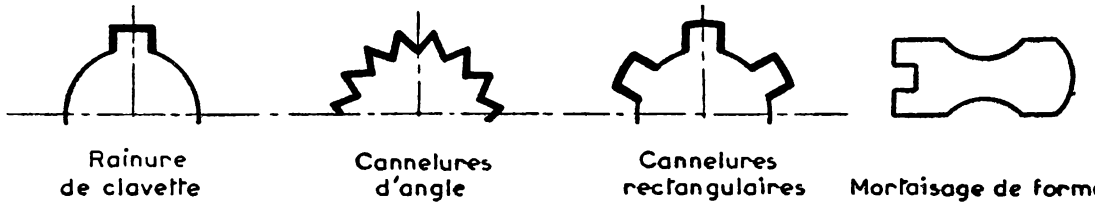


Fig:267– Rainurage intérieur par mortaisage

III. — RAINURAGE PAR BROCHAGE (1)

Le brochage, même pour des séries relativement peu importantes et malgré le coût élevé de l'outil, est l'unique procédé qui permet d'obtenir des rainures extérieures ou intérieures aux formes bien finies et aux dimensions parfaitement interchangeables pour le prix de revient minimum.

A. RAINURES EXTÉRIEURES (fig. 268).

La broche est taillée sur un seul côté. L'action de la broche sur la pièce et la réaction de la pièce sur l'outil doivent donc être équilibrées par des ablocages, des butées ou des glissières appropriées.

La table des machines à brocher verticales étant inclinable, il est possible d'y exécuter des rainures obliques.

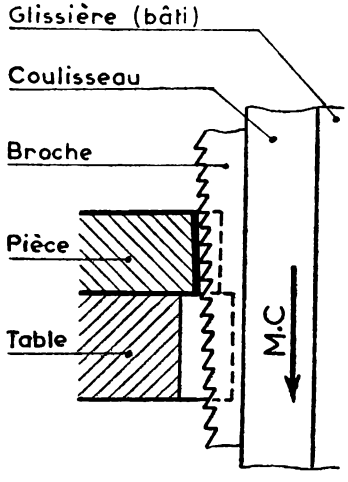


Fig:268– Brochage d'une rainure extérieure

B. RAINURES INTÉRIEURES

Dans le cas d'une seule rainure, rainure de clavette par exemple, la pièce est montée sur un porte-pièce qui joue en

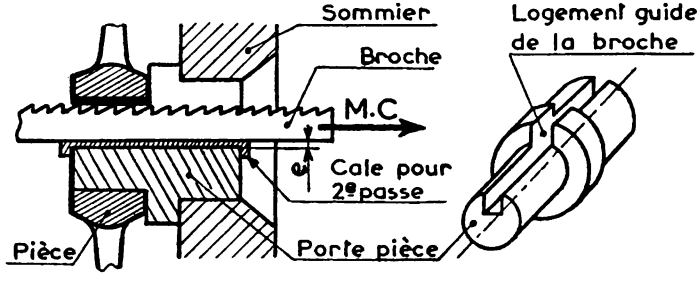


Fig:269– Brochage d'une rainure de clavette.

(1) Voir « le brochage », chapitre « Surfaçage plan ».

même temps le rôle de guide-broche (fig. 269). Si la rainure, trop profonde, n'est pas exécutable en une seule opération, on réalise une deuxième passe avec la même broche en comblant à l'aide d'une cale, l'épaisseur **e** de la matière enlevée au cours de la première passe.

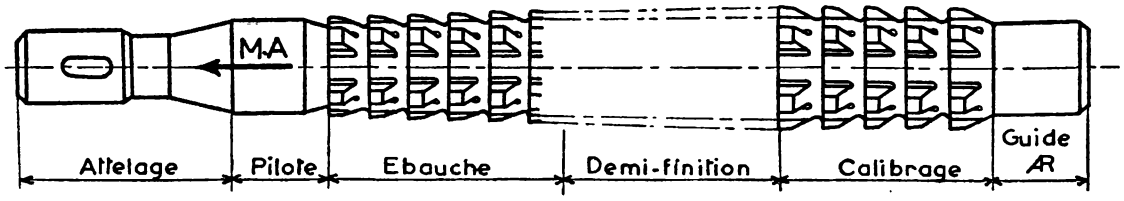


Fig:270- Broche pour rainer des moyeux à cannelures droites

Pour l'exécution des cannelures de moyeux, la broche a autant de baguettes de dents que le moyeu doit présenter de cannelures (fig. 270). L'opération réalisée en une seule passe, est pratiquée sur une machine verticale lorsqu'il y a peu de matière à enlever, mais la machine horizontale est indiquée dans le cas contraire en raison de la grande longueur de course nécessaire.

Pour le brochage des cannelures hélicoïdales, les baguettes de dents sont inclinées suivant l'hélice à obtenir. Un dispositif adjoint à la machine commande la rotation de la broche au cours de son enfoncement.

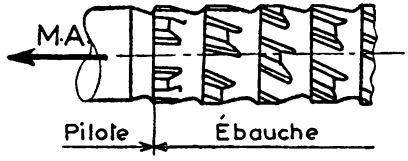


Fig:271 - Broche pour rainures intérieures hélicoïdales.

LES TRAVAUX DE RECTIFICATION

La rectification est un usinage par **abrasion,** c'est-à-dire par désagrégation de la matière en très petits copeaux par l'action de grains durs et anguleux. Ces **grains abrasifs** sont réunis les uns aux autres par un agglomérant pour former un solide de révolution désigné sous le nom de **meule.**

Les copeaux obtenus sont dits **copeaux grattés** par opposition aux **copeaux taillés,** de section beaucoup plus importante, produits par les outils de coupe ordinaires. Ces copeaux grattés étant très petits, on comprend aisément que l'on puisse, par rectification, respecter une cote avec plus de précision que par tournage, rabotage... ou obtenir un meilleur état de surface.

L'OUTIL MEULE

I. — CARACTÉRISTIQUES D'UNE MEULE

Les caractéristiques qui définissent une meule sont : sa forme, ses dimensions et sa constitution (voir cours de classe de troisième). Nous rappellerons seulement les spécifications de la constitution en suivant l'ordre suivant lequel elles sont inscrites sur la meule (tableau n° 3).

A. NATURE DE L'ABRASIF

1° Abrasifs artificiels.

a. Abrasifs alumineux. Ce sont des cristaux d'alumine désignés sous le nom de corindon. Leur symbole est **A.** Un indice numérique de pureté peut précéder ce symbole.

Ex. : corindon **38A,** c'est de l'alumine presque pure (99 %) ; corindon **19A,** alumine moins pure (95 %) ; corindon **A,** 85 % d'alumine.

Les abrasifs alumineux sont les plus durs ; ils conviennent le mieux pour le meulage des métaux durs et tenaces : aciers, bronze.

b. Abrasifs silicieux. Les carbures de silicium, symbole **C** constituent la base de l'abrasif crystolon : le crystolon noir, **37C,** et le crystolon vert, **39C.**

Ils sont moins durs que les précédents et sont utilisés pour le travail de la fonte et pour le cuivre, l'aluminium et leurs alliages. On les emploie aussi pour l'affûtage d'ébauche des carbures métalliques sur lesquels leurs cristaux se brisent facilement et présentent ainsi constamment des arêtes coupantes vives.

2° Abrasifs naturels.

Le diamant est le seul utilisé. Son symbole est **D** sans indice de pureté.

Son prix très élevé le fait réserver à l'usinage des corps très durs (affûtage des carbures métalliques) sous un volume réduit. La meule est constituée par un disque métallique dont une face est enduite de poudre de diamant incrustée.

B. GROSSEUR DES GRAINS

La grosseur des grains est symbolisée par le nombre de mailles au pouce linéaire d'un tamis à travers lequel les grains ont passé. Ainsi un grain n° 10 a comme grosseur approximative 25,4 : 10 = 2,5 *mm*.

Au-delà du n° 320, la grosseur est mesurée par le temps de décantation de la poudre. **Ex. :** pour une poudre 10 *minutes*, la grosseur du grain correspond au n° 400.

De la grosseur du grain dépend l'état de surface obtenu. Plus le fini est poussé, plus le grain doit être fin. **Ex. :** les grains n° 36 laissent une rugosité nettement visible, les grains n° 120 donnent un très bon fini et les grains n° 800 permettent d'atteindre le poli miroir.

C. GRADE

Le grade d'une meule est exprimé par une lettre de **D** à **Z**. Il caractérise la force avec laquelle l'agglomérant retient les grains, c'est-à-dire l'opposition à la désagrégation de la meule pendant le travail. La dureté d'une meule, ou sa résistance à l'usure, est indépendante de la dureté de son abrasif; elle dépend de son grade qui est dit dur ou tendre.

Le grade d'une meule est choisi en fonction des facteurs principaux suivants :

1° Dureté et ténacité du métal meulé.

Plus le métal meulé est dur et tenace, plus les grains s'usent vite et plus le grade doit être tendre afin de libérer les grains usés plus facilement. Inversement, pour un métal tendre, le grade doit être dur.

Une meule qui se lustre a un grade trop dur. Si elle s'use trop vite, le grade est trop tendre.

2° Grandeur de la surface en contact meule-pièce.

Pour un même métal usiné, plus cette surface est grande, plus les grains s'usent vite. La dureté du grade doit donc être à l'inverse de la surface de contact meule-pièce.

3° Vitesse de rotation de la meule.

Lorsque la meule tourne vite, le temps de contact est plus court que lorsqu'elle tourne rapidement. Les grains, qui s'échauffent lors du travail, se refroidissent donc plus rapidement et l'agglomérant conservant mieux son pouvoir liant, la meule se désagrège moins facilement.

En conséquence, on peut choisir un grade un peu plus tendre si la meule a une vitesse élevée et un grade un peu plus dur si elle tourne moins rapidement.

D. STRUCTURE

La structure est l'indice du tassement des grains. Elle définit la grosseur des pores de la meule. Les pores superficiels servent au logement du copeau pendant la durée du contact meule-pièce.

La structure est caractérisée par un nombre de 0 à 12, le n° 12 caractérise une **meule ouverte** où les pores sont les plus gros, le n° 0 une **meule fermée** où les pores sont les plus petits.

Le choix de la structure se fait en fonction. :

1° **De la nature de l'opération :** ébauche ou finition. Plus les copeaux sont gros, plus les pores doivent être gros et plus la meule doit être ouverte.

2° **De la grandeur de la surface en contact.**

Pour une même opération, une grande surface de contact entraîne la formation de gros copeaux. Il faut donc une structure d'autant plus ouverte que la surface de contact meule-pièce est plus grande.

Nature de l'abrasif				Grosseur de grain						Grade					Structure			Agglomérant		
Symboles		Marque Norton	Nature	Très gros	Gros	Moyen	Fin	Très fin	Poudre	Très tendre	Tendre	Moyen	Dur	Très dur	Fermée	Moyenne	Ouverte	Nature	Symboles	
Norton	Universel																		Universel	Complémentaire
	A	Alundum régulier	Corindon régulier	6	12	30	90	220	400	D	H	L	P	T	0	4	7	Vitrifié	V	BA, BE, P
19	A	Alundum 19	d° spécial	8	14	36	100	240	500											
32	A	d° 32	d° supérieur	10	16	40	120	280	600	E	I	M	Q	U	1	5	8	Silicate	S	V
38	A	d° 38	d° supérieur		20	46	150	320							2	6	9	Caoutchouc	R	F
37	C	Crystolon 37	Carbure de Si noir		24	54	180			F	J	N	R	W	3		10	Résinoïde	B	H, 5, 7, 9, P
39	C	d° 39	d° vert			60				G	K	O	S	Z			11	Métallique	M	Pour meule diamant
	D		Diamant			70											12			
						80														

Tableau n° 3. — Spécifications de constitution d'une meule (d'après Norton).

Ex. : Les symboles 38A 46 K 8 VBE signifient : abrasif corindon supérieur, grain moyen, grade tendre, structure ouverte, agglomérant vitrifié.

E. AGGLOMÉRANT

On distingue :

1° Les agglomérants vitrifiés.

Ils ont pour origine l'argile qui se vitrifie à la cuisson. Les meules vitrifiées sont de haute qualité et très utilisées car du fait de la vitrification de l'agglomérant, elles supportent très bien le liquide d'arrosage.

Leur symbole est la lettre **V** qui peut être suivie d'autres lettres indiquant la pureté de l'agglomérant. **Ex. : VBE** qui est le symbole d'un agglomérant de qualité supérieure.

2° Les agglomérants silicatés.

Leur symbole est **S.** Ils proviennent de la cuisson du silicate de soude et entrent principalement dans la fabrication des meules de grand diamètre.

3° Les agglomérants dits élastiques.

Caoutchouc (symbole **R**) et résines synthétiques (symbole **B**) sont les principaux.

Les résines synthétiques ou résinoïdes, servent à la confection des meules très minces (meules à tronçonner, à affûter les fraises). Le caoutchouc, ou Rubber, est l'agglomérant des meules d'entraînement pour rectification sans centres.

II. CONDITIONS D'UTILISATION DES MEULES

Une meule bien choisie ne travaille correctement que si les conditions d'utilisation ci-après sont strictement remplies :

A. VITESSE CIRCONFÉRENTIELLE

Elle dépend de la nature de l'agglomérant, du grade et aussi de la forme de la meule.

Les valeurs limites données par le tableau n° 4 ne doivent pas être dépassées pour éviter l'éclatement de la meule sous l'action de la force centrifuge.

Chaque élément de la meule, de masse **M**, dont le centre de gravité est situé à une distance **R** de l'axe de rotation et dont la vitesse angulaire est ω, est sollicité par une force centrifuge :

$$\mathbf{F = M\,\omega^2\,R}$$

Elle risque de provoquer l'éclatement de la meule lorsque la vitesse est trop grande, l'agglomérant n'assurant plus une liaison suffisante. Il faut donc, par mesure de sécurité, faire tourner la meule à l'intérieur d'un carter de protection.

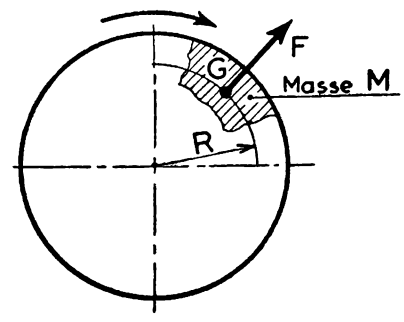


Fig: 272- Action de la force centrifuge.

A titre indicatif, un fragment de meule (fig. 272) ayant une masse M = 0,1 unité M kgp S (poids 1 *kg f* environ), tournant à V = 30 *m/s* et pour lequel R = 0,2 *m*, est sollicité par une force centrifuge :

$$F = M\,\omega^2\,R = M\left(\frac{V}{R}\right)^2 R = 0{,}1 \times \left(\frac{0{,}2}{30}\right)^2 \times 0{,}2 = 450\ kgf$$

Type de meule	Grosseur du grain	Nature de l'agglomérant et grade					
		Vitrifié			Résines synthétiques		
		Grade tendre	Grade moyen	Grade dur	Grade tendre	Grade moyen	Grade dur
Meules plates et assiettes	24 à 16	23 m/s	25 m/s	33 m/s	30 m/s	40 m/s	50 m/s
	30 et plus fin	28 m/s	30 m/s	33 m/s			
Boisseaux droits et coniques	24 à 16	25 m/s	25 m/s	28 m/s	25 m/s	35 m/s	40 m/s
	30 et plus fin	25 m/s	28 m/s	30 m/s	30 m/s	40 m/s	45 m/s

Tableau n° 4. — Extrait du « Code du Travail » fixant les vitesses périphériques limites d'utilisation des meules.

B. GRANDEUR DE L'AVANCE

Pour une avance par tour de pièce égale à l'épaisseur de la meule, il y a reproduction intégrale du défaut de rectitude de la génératrice de la meule (fig. 277-1). Pour une avance plus petite (fig. 277-2) il y a diminution du défaut de surface. Cependant une avance trop petite est à rejeter car elle engendre une usure rapide des bords de la meule du fait que ce sont alors ces seuls bords qui détachent les copeaux.

Dans le cas d'ébauche, on prend généralement une avance par tour de pièce égale à la moitié de l'épaisseur de la meule : $\mathbf{a} = \frac{\mathbf{e}}{2}$ Pour la finition on peut prendre de $\mathbf{a} = \frac{\mathbf{e}}{3}$ à $\mathbf{a} = \frac{\mathbf{e}}{8}$

L'avance $\mathbf{a}'$ par tour de meule se déduit des conditions de travail précédentes. On a en effet :

$$\mathbf{a}' = \mathbf{a}\,\frac{\mathbf{N}'\,tr/mn\ pièce}{\mathbf{N}\,tr/mn\ meule}$$

Pour $\mathbf{e} = 40\,mm$, $\mathbf{N}' = 20\,tr/mn$, $\mathbf{N} = 1\,500\,tr/mn$ et $\mathbf{a} = \frac{\mathbf{e}}{2}\,mm$ on aurait :

$$\mathbf{a}' = \left(\frac{40}{2} \times \frac{20}{1\,500}\right) = 0{,}26\ mm.$$

Pendant cette avance latérale de 0,26 *mm* par tour de meule, une grande quantité de grains situés sur le champ de la meule a passé sur la pièce. Il en résulte que le copeau arraché par chaque grain est extrêmement réduit.

C. PROFONDEUR DE PASSE

La profondeur de passe varie suivant la nature du travail. Le grain étant plus gros et la structure plus ouverte pour l'ébauche que pour la finition, la profondeur de passe doit diminuer en allant de l'ébauche à la finition.

Ex. : ébauche : de 0,05 à 0,1 ; demi-finition : de 0,02 à 0,01 ; finition : de 0,002 à 0,001.

En finition on effectue quelques passes jusqu'à suppression des étincelles. C'est ainsi qu'on fait disparaître les défauts qui proviennent du fléchissement de la pièce.

D. ARROSAGE

Le meulage échauffe rapidement les pièces. Pour éviter leur déformation et aussi la perte de dureté superficielle pouvant provenir d'un trop fort échauffement, il faut travailler sous arrosage.

1° Différents modes d'arrosage.

a. Arrosage par ajutage (fig. 273-1). Le liquide arrive par un ajutage terminé *en sifflet* et orienté de façon que le liquide tombe sur la pièce au lieu d'être attiré par la meule. De plus, la largeur de l'ajutage doit être inférieure à l'épaisseur de la meule pour éviter la projection du liquide par le courant d'air qui est chassé vers la périphérie sur chaque face de la meule.

b. Arrosage par l'intérieur de la meule. La figure 273-2 illustre ce mode d'arrosage. Du fait de la porosité de certaines meules (meules vitrifiées), et sous l'effet de la force centrifuge, le liquide traverse la meule et se trouve retenu au contact de la pièce qu'il refroidit parfaitement.

Cependant, si le liquide d'arrosage, qui circule en circuit fermé, entraîne avec lui les copeaux et les produits de désagrégation de la meule, il devient boueux. Les pores sont alors obstrués et l'arrosage ne se fait plus. Il faut donc munir le réservoir d'un filtre efficace.

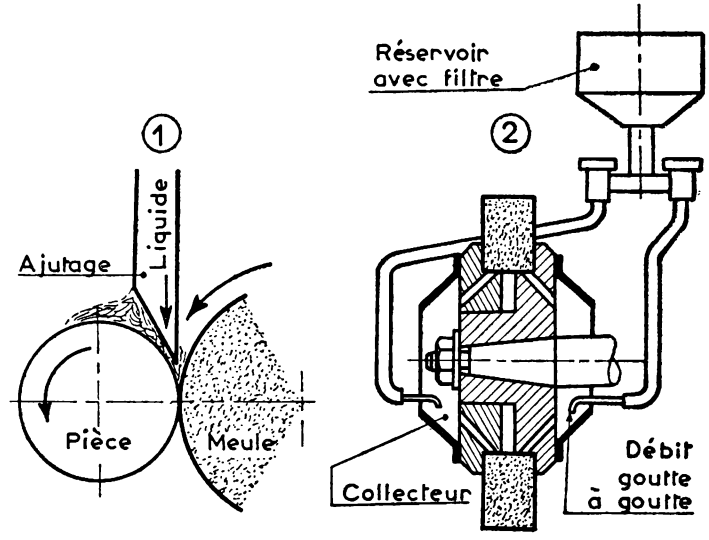


Fig:273- Divers modes d'arrosage d'une meule.
① Par ajutage spécial et orienté.
② Par l'intérieur de la meule.

2° Quelques liquides d'arrosage.

Un bon liquide d'arrosage ne doit pas oxyder la machine ni les pièces.

Certains produits (l'Hougthongrid par exemple) donnent satisfaction sur ce point pour tous les métaux ferreux.

Norton recommande pour la rectification sur acier les mélanges suivants :

Pour agglomérant vitrifié	eau	200 l
	carbonate de potasse anhydre	7 *kg*
	carbonate de soude	1 *kg*
	huile de colza	3 l
Pour agglomérant silicate	eau	200 l
	carbonate de soude anhydre	4 *kg*
	huile de colza	3 l

D'autre part, des essais ont montré que, sur pièces en acier trempé, l'huile de colza pure donne un très bon résultat et un bel état de surface avec l'agglomérant vitrifié.

Remarque. — Les poussières abrasives sont nocives pour l'ouvrier et détruisent la précision de la machine en provoquant l'usure des surfaces de guidage. Un autre avantage de l'arrosage est de supprimer la dispersion de ces poussières.

RECTIFICATION PLANE

I. — PRINCIPE DE LA RECTIFICATION PLANE

La meule étant, comme la fraise, un outil tournant, le meulage plan présente une grande analogie avec le fraisage. En effet, on peut obtenir un plan :

A. PAR OUTIL DE FORME

Dans ce cas, l'outil qui est une meule plate, travaille tangentiellement comme la fraise de profil.

Lorsque la surface est étroite (fig. 274-1) deux mouvements sont suffisants pour l'engendrer : le mouvement de coupe de la meule et le mouvement d'avance de la pièce qui est d'ailleurs aussi un mouvement de coupe secondaire.

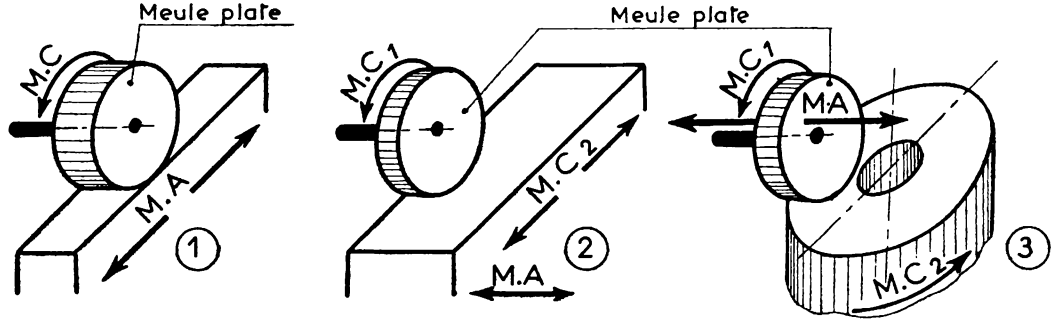


Fig:274- Rectification du plan par meule de forme travaillant tangentiellement.

Lorsque la surface est large (fig. 274-2) le déplacement transversal de la meule est le mouvement d'avance proprement dit tandis que le mouvement longitudinal de la pièce est un mouvement de coupe secondaire.

Si la surface est circulaire (fig. 274-3) la pièce est animée d'un mouvement de rotation qui constitue le mouvement de coupe secondaire.

B. PAR OUTIL D'ENVELOPPE

L'outil est une meule boisseau cylindrique ou conique qui travaille comme une fraise de face (fig. 275).

II. — RECTIFICATION PAR MEULE PLATE TRAVAILLANT TANGENTIELLEMENT

A. LA SURFACE EST ÉTROITE

On utilise une meule plus épaisse que la largeur de la pièce (fig. 276). Ceci permet de légers déplacements axiaux de la meule ou transversaux de la pièce, déplacements ayant pour but de conserver la rectitude de la génératrice de la meule.

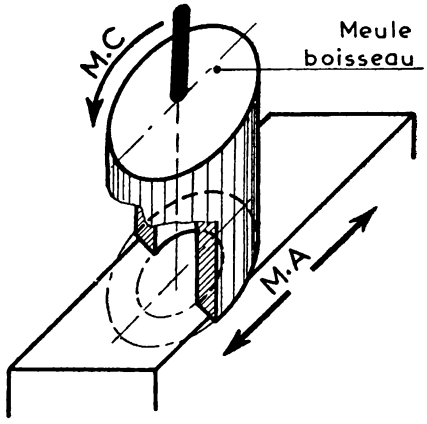


Fig:275 – Rectification du plan par meule travaillant de face.

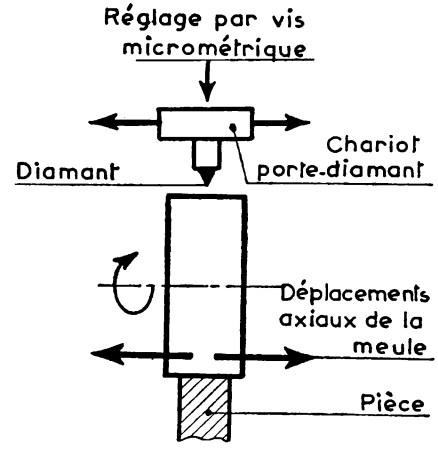


Fig:276- Meulage de surfaces étroites

Malgré cette précaution, il faut de temps à autre redresser la meule au diamant monté sur un petit chariot fixé à demeure sur la machine. Toutes les rectifieuses planes modernes en sont munies.

B. LA SURFACE EST LARGE

Une avance transversale de la pièce ou de la meule est nécessaire pour que toute la surface soit atteinte.

Nous avons déjà vu que, la rectitude de la génératrice de la meule n'étant pas parfaite, il

faut que l'avance soit plus faible que l'épaisseur de la meule (fig. 277). On lui donne une valeur comprise entre la moitié et le quart de l'épaisseur de la meule en ébauche et entre le tiers et le huitième en finition.

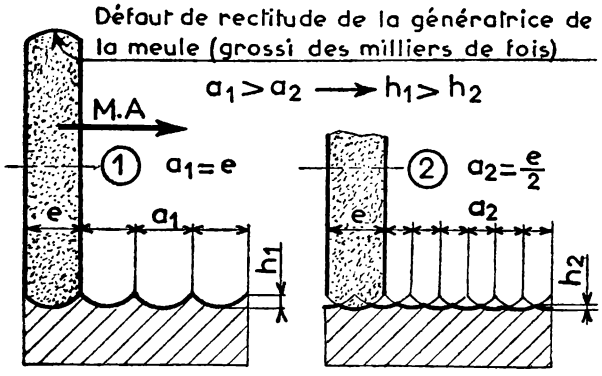


Fig:277-Variation des défauts d'une surface meulée d'après la grandeur de l'avance et la grandeur du défaut de rectitude de la génératrice de la meule.

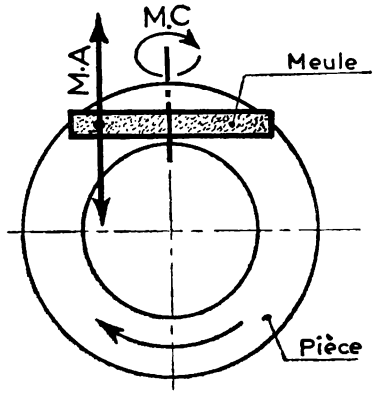


Fig:278-Rectification d'une pièce en couronne.

C. LA SURFACE EST CIRCULAIRE.

Le porte-pièce est animé d'un mouvement de rotation (fig. 278). Le procédé est surtout appliqué à la rectification des surfaces en forme de couronne circulaire plane. Dans ce cas, le gain de temps est considérable par rapport à un même travail effectué sur machine à table alternative.

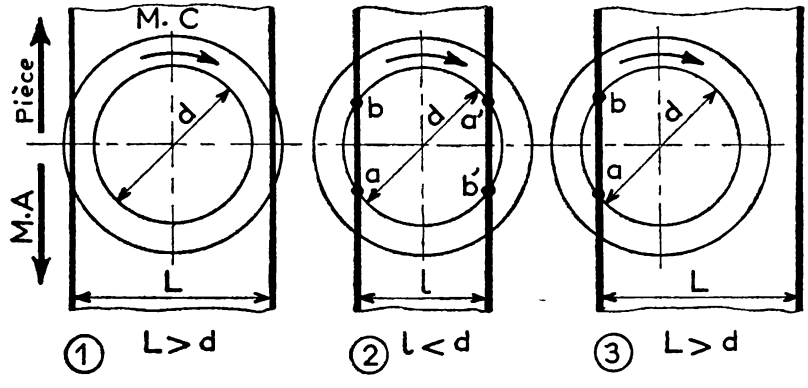


Fig:279- Position d'une meule boisseau rapportée à la largeur de la pièce.
① Les copeaux ne peuvent se dégager.
② et ③ Les copeaux peuvent se dégager.

III. — RECTIFICATION PAR MEULE BOISSEAU TRAVAILLANT DE FACE

La partie active de la meule est une couronne plane (fig. 279-1-2-3).

Pour obtenir de bons résultats, il ne faut pas que la partie active soit en contact entier avec la surface à rectifier car les copeaux ne pouvant s'échapper (fig. 279-1), les pores superficiels s'emplissent rapidement, la meule ne coupe plus, elle raye la surface et fait chauffer énormément la pièce.

Donc :

— ou la surface est plus étroite que le diamètre intérieur **d** de la couronne; dans ce cas, les copeaux peuvent s'échapper en **ab** et **a'b'** (fig. 279-2);

— ou la surface est plus large que **d** et il faut alors faire déborder la meule (fig. 279-3) suivant **ab.**

Pour les surfaces très larges, on remplace la meule boisseau par une meule segmentée (fig. 280). Les vides entre les segments assurent un bon dégagement des copeaux et diminuent l'échauffement des pièces meulées.

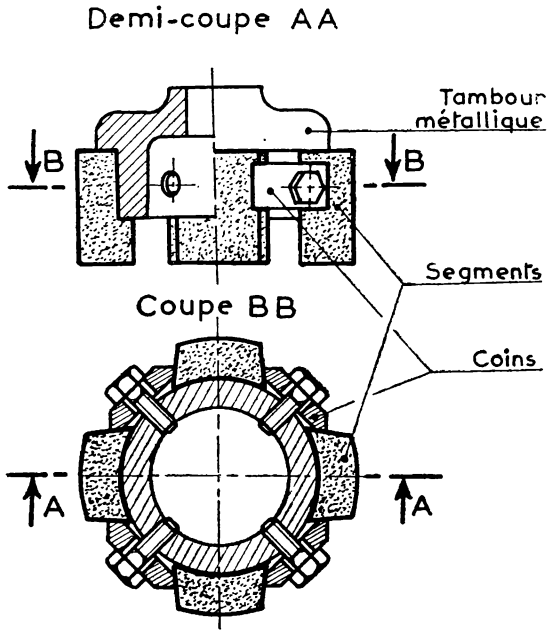


Fig:280- Meule segmentée

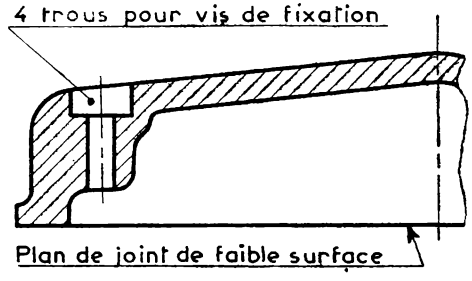


Fig:281-Couvercle de réducteur de vitesse.

IV. — MEULAGE DES PIÈCES BRUTES

Nous ne nous étendrons pas longuement sur ce procédé de travail, bien que dans certains cas il apporte une solution facile.

Soit à dresser, par exemple, le plan de joint d'un couvercle de réducteur de vitesse (fig. 281). L'opération est évidemment possible à la fraiseuse, mais il faut un ablocage assez délicat du fait de la forme de la pièce et de l'épaisseur réduite de sa paroi. De plus, bien que les tolérances

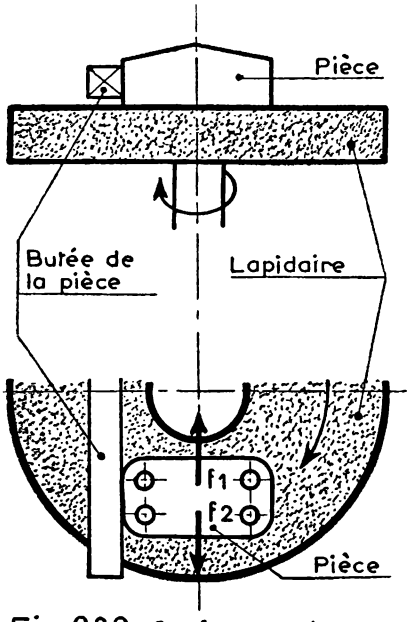


Fig:282- Surfaçage plan au lapidaire.

d'usinage soient larges, un joint est prévu pour assurer l'étanchéité contre les pertes d'huile. Dans ce cas, le surfaçage du plan de joint peut être plus avantageusement obtenu par meulage sur une meule de grand diamètre, appelée **lapidaire,** la pièce étant tenue à la main (fig. 282). Pour éviter son entraînement, une butée réglable la maintient. Afin de conserver la planéité du lapidaire, un déplacement de la pièce suivant les flèches $\mathbf{f}_1$ et $\mathbf{f}_2$ est nécessaire.

MACHINES DE RECTIFICATION PLANE

I. — MACHINES SIMPLES

On distingue les machines dont la meule travaille de profil (revoir fig. 215, 2e partie) et celles où la meule travaille de face (fig. 283) en utilisant soit des meules assiettes, soit des meules boisseaux ou encore des meules segmentées.

Toutes ces machines sont munies d'un système d'arrosage et d'un aspirateur dans le cas d'un travail à sec.

Lorsque des parties de glissières sont à jour, elles sont protégées des poussières abrasives par des tôles télescopiques, des soufflets en cuir ou en toile imperméabilisée, ou encore par des bandes sans fin souples ou métalliques.

Pour le meulage sous arrosage, un dispositif amovible de bandes souples ou de tôles permet d'encadrer la meule suivant le périmètre de la table pour éviter les projections.

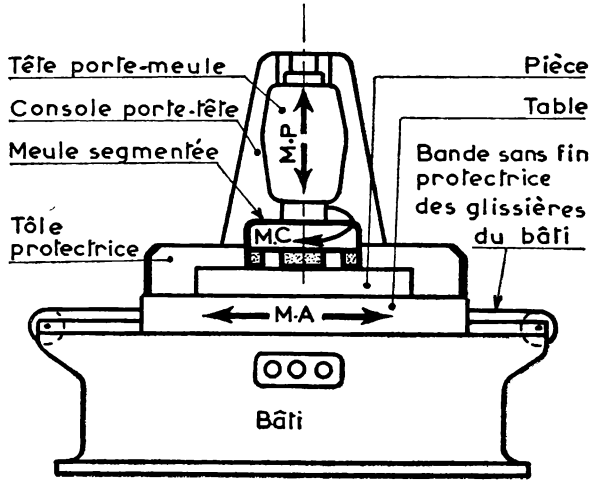


Fig:283- Rectifieuse plane de grande capacité avec meule travaillant de face.

II. — MACHINES A TÊTES MULTIPLES

La figure 284 est le schéma de principe d'une telle machine (machine Pégard) conçue pour la rectification des bancs de machines-outils. Dans ses grandes lignes, elle présente une certaine analogie avec la raboteuse.

Des têtes verticales et horizontales sont orientables sur une traverse et permettent la rectification simultanée de surfaces planes associées avec une grande précision.

Remarque. Toutes les machines à rectifier ont une translation de table commandée par système hydraulique pour éviter le phénomène du broutement mécanique appelé aussi reproduction ou marquage. Toutefois, les petites machines d'établi sont encore à commande manuelle par pignon et crémaillère.

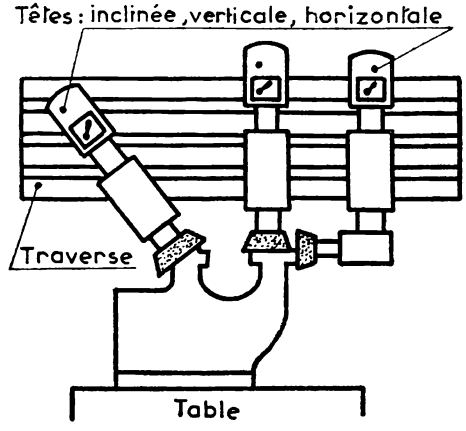


Fig:284- Schéma d'une machine à rectifier à têtes multiples orientables.

Travaux de rectification plane

La rectification étant surtout une opération de finition, l'ablocage des pièces nécessite de grands soins. Ceci afin d'éviter les déformations élastiques qui feraient ressortir des défauts de forme des pièces après démontage.

Lorsque l'ablocage sur plateau magnétique est possible, il est avantageux du point de vue temps. Cependant, il faut passer ensuite les pièces au démagnétiseur pour détruire le magnétisme rémanent, surtout sur les pièces trempées, parce qu'il provoque l'attraction des limailles et poussières ferreuses.

RECTIFICATION DE SURFACES ASSOCIÉES

En principe, une meule plate ne doit travailler que sur son champ, c'est-à-dire de profil' et une meule assiette, une meule boisseau ne doivent travailler qu'en bout, c'est-à-dire de face. Il est plus facile ainsi de redresser la meule et cette opération limitée au champ ou à la face use la meule beaucoup moins vite.

D'autre part, une meule perd très rapidement ses angles et ceci d'autant plus que ces angles sont plus aigus, parce que les grains y sont mal liés. Il faut donc prévoir des dégagements lorsque les surfaces forment entre elles des angles rentrants.

Les figures 285 et 286 montrent comment, en respectant ces principes, on peut rectifier des surfaces associées sur machine simple et la figure 287 sur machine à têtes multiples.

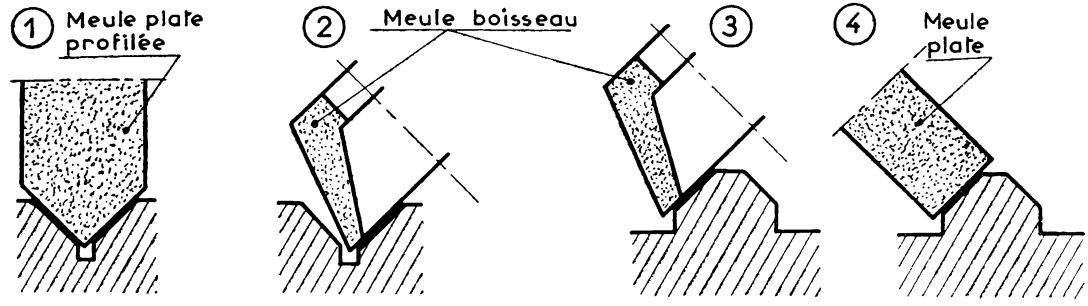


Fig: 285– Rectification de guidages en vé :
(1) A la meule plate profilée – (2) et (3) A la meule boisseau ou à la meule assiette – (4) A la meule plate inclinée.

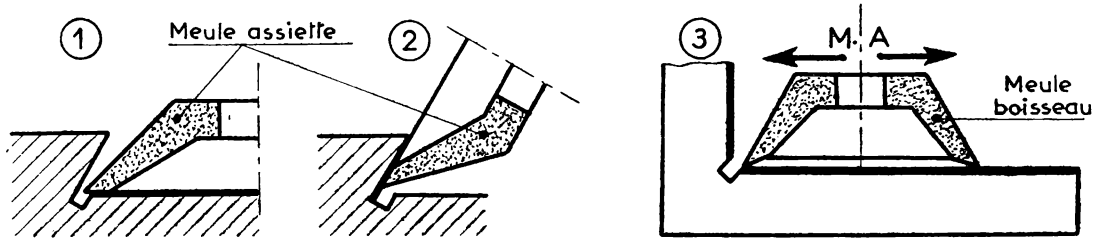


Fig: 286– (1) et (2) Rectification du fond et des flancs d'une glissière en queue d'aronde.
(3) Rectification intérieure d'une équerre à la meule boisseau.

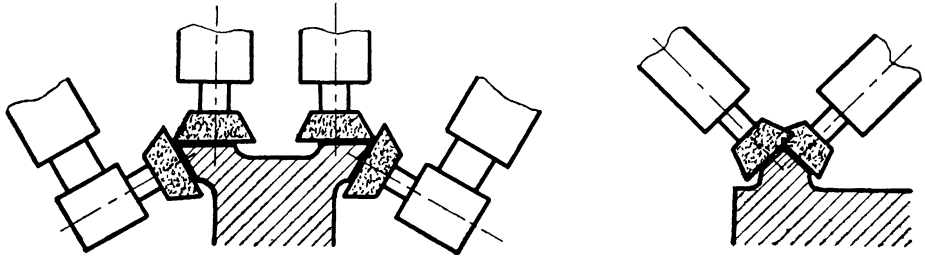


Fig: 287– Exemples de rectification simultanée de surfaces associées sur machines à têtes multiples.

La pièce qui doit subir l'opération de rectification peut recevoir son mouvement de rotation de son porte-pièce (pointes et toc, mandrin) ou dans le cas de la rectification dite sans centres, d'une meule d'entraînement qui ne la supporte pas.

I. — RECTIFICATION EXTÉRIEURE DU CYLINDRE ET DU CÔNE

A. PRINCIPE DE LA RECTIFICATION DES PIÈCES LONGUES (fig. 288).

Pièce et meule sont animées d'un mouvement de rotation : c'est le mouvement de coupe. La pièce reçoit le plus souvent le mouvement d'avance tantôt dans un sens, tantôt dans le sens opposé, mais de telle sorte que la génératrice de la meule soit toujours en contact avec une génératrice de la pièce. Le mouvement d'avance doit donc être parallèle à l'axe de la meule. Il en résulte qu'on obtient :

— une surface cylindrique si l'axe de la pièce est parallèle à l'axe de la meule (fig. 288-1) ;

— une surface conique si l'axe de la pièce et l'axe de la meule sont concourants (fig. 288-2).

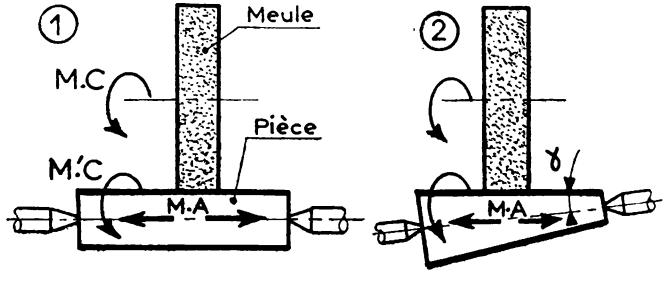


Fig:288 Rectification de pièces longues.
(1) Rectification cylindrique (2) Rectification conique

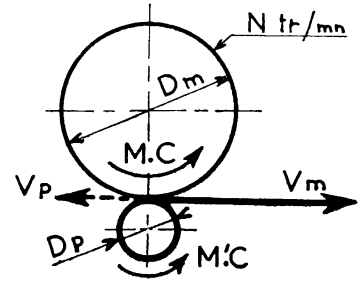


Fig:288 bis- Vitesse de coupe en rectification cylindrique.

Remarques. 1° De même que pour le tournage, les pièces flexibles seront soutenues par des lunettes.

2° La pièce et la meule tournent dans le même sens (fig. 288 bis). Les vecteurs vitesses, au point de contact meule-pièce sont de sens opposés et leur somme indique la vitesse de coupe réelle $\mathbf{V}$. On a donc $\mathbf{V} = \mathbf{V}_m + \mathbf{V}_p$. Mais comme $\mathbf{V}_p$ est petit (environ 15 m/mn) par rapport à $\mathbf{V}_m$ qui est plus de cent fois plus grand (30 à 35 m/s), on le néglige et la vitesse de coupe propre à la meule est pratiquement :

$$\mathbf{V}\ m/s = \frac{\pi \mathbf{DN}}{1\,000 \times 60}$$

B. PRINCIPE DE RECTIFICATION DES SURFACES COURTES.

Il n'est plus nécessaire dans ce cas de donner une avance longitudinale à la pièce, mais seulement un mouvement de pénétration à la meule : c'est la rectification en plongée à l'outil de forme (fig. 289).

La génératrice de la meule doit être parfaitement rectiligne, ce qui nécessite un dressage soigné et relativement fréquent au diamant. La meule est d'une épaisseur supérieure à la longueur à rectifier.

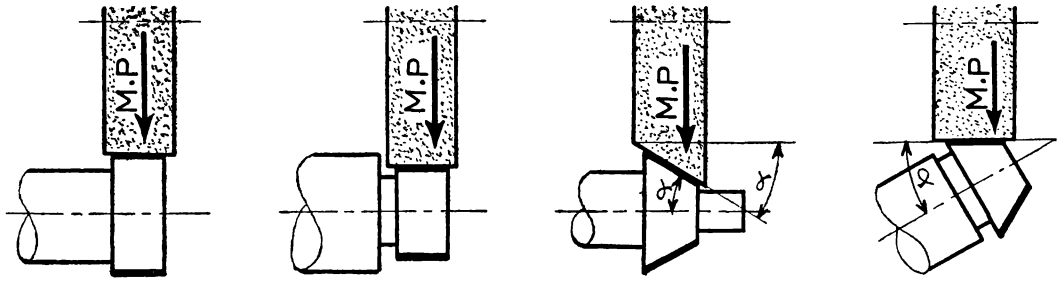


Fig:289- Exemples de pièces rectifiées en plongée.
M.P : Mouvement de plongée.

C. RECTIFICATION D'ÉPAULEMENTS.

La rectification des faces d'épaulements doit être pratiquée indépendamment de la rectification cylindrique. En effet, une meule ne doit jamais travailler simultanément par son champ et par une de ses faces (fig. 290) car, par suite de la réaction $\mathbf{R}_A$ de la pièce, elle se gauchit. Cette déformation entraîne un engagement élastique de la meule dans la partie cylindrique de la pièce et occasionne parfois un broutement.

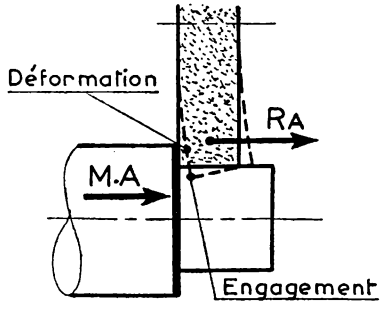


Fig:290-La réaction RA fait fléchir la meule.

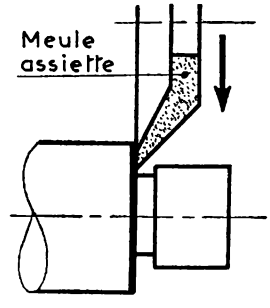


Fig:291- Rectification d'un épaulement.

L'épaulement doit donc être exécuté séparément à la meule plate ou à la meule assiette qui travaillent en plongée (fig. 291). Une gorge de dégagement facilite beaucoup le travail et n'affaiblit pratiquement pas la pièce.

II. — RECTIFICATION INTÉRIEURE DU CYLINDRE ET DU CÔNE

A. RECTIFICATION DES PIÈCES MONTÉES EN L'AIR.

Les pièces montées en l'air sont fixées soit en plateau, soit en mandrin, en mors durs ou en mors doux. Les pièces longues rectifiées en bout sont soutenues par une lunette d'extrémité.

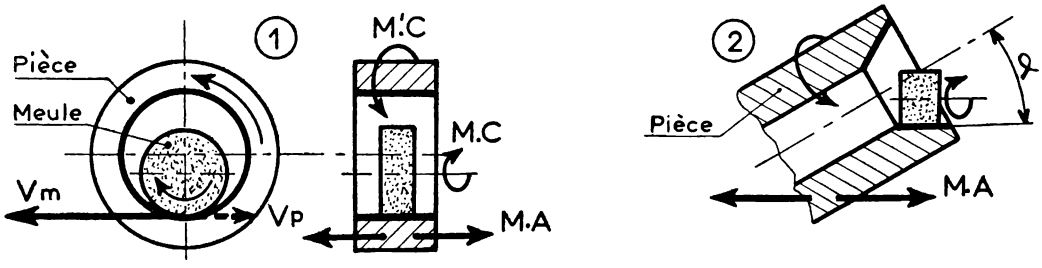


Fig:292– Principe de la rectification intérieure.
(1) Rectification cylindrique - (2) Rectification conique.

Pièce et meule tournent en sens contraires et la vitesse de coupe réelle est $\mathbf{V} = \mathbf{V}_m + \mathbf{V}_p$, mais $\mathbf{V}_p$ est négligeable. Le mouvement d'avance peut être transmis à la pièce ou à la meule.

Pour que l'alésage soit cylindrique, il faut évidemment que le mouvement d'avance soit parallèle à l'axe de la pièce (fig. 292-1). Si les deux axes sont concourants, l'alésage est conique (fig. 292-2).

B. RECTIFICATION DES PIÈCES LOURDES OU DE GRANDE EXCENTRATION.

Lorsque la pièce est lourde ou très excentrée, afin d'éviter le balourd qui provoquerait des défauts de forme, on la monte sur la table fixe d'une machine à rectifier spéciale. La meule y reçoit, en plus des mouvements de coupe et d'avance habituels, un mouvement planétaire **M'C** autour de l'axe de l'alésage. La meule engendre donc un cylindre sans que la masse de la pièce soit mise en mouvement (**ex.** : bloc de moteur à 4 cylindres).

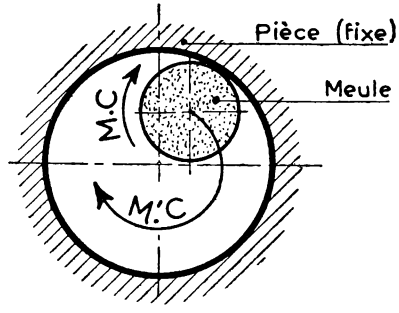


Fig:293– Rectification cylindrique par planétaire.

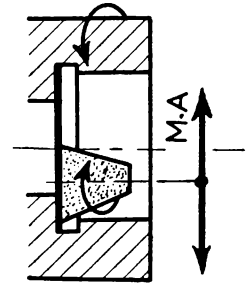


Fig:294– Rectification d'un épaulement intérieur.

C. RECTIFICATION D'ÉPAULEMENTS.

Une gorge est prévue pour faciliter l'usinage. Après rectification cylindrique ou conique, on monte une meule boisseau conique ou une meule tronconique à axe noyé dans sa masse et l'on dresse l'épaulement (fig. 294).

La rectification plane en bout (fig. 295) peut être réalisée par la meule qui a servi à la rectification cylindrique ou à l'aide d'une meule boisseau si la différence des diamètres extérieur et intérieur est importante.

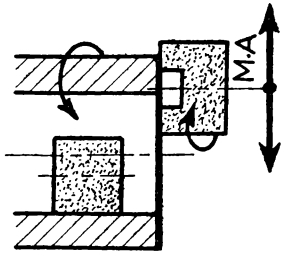


Fig:295 - Rectification d'une face plane.

MACHINE A RECTIFIER CYLINDRIQUE

La figure 296 représente une rectifieuse cylindrique Gendron. Le mouvement d'avance est donné à la table et le mouvement de pénétration à la meule. Ces deux mouvements sont à commande hydraulique. L'arbre porte-meule est supporté par des paliers fluides (1).

La table coulissante porte une table pivotante pour la réalisation entre-pointes des pièces coniques (fig. 297).

La tête porte-pièce est pivotante, ce qui permet la rectification conique intérieure ou extérieure des pièces courtes montées en l'air (fig. 298).

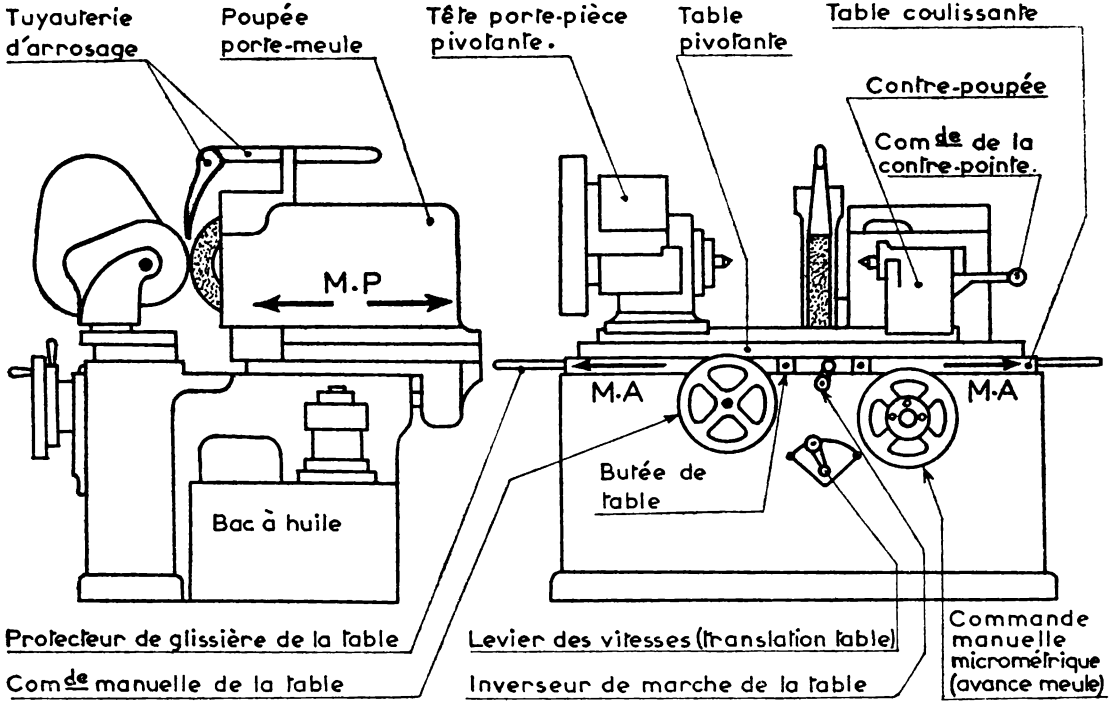


Fig: 296- Rectifieuse cylindrique "Gendron" type 15x100

(1) Voir « Étude fonctionnelle des machines-outils », deuxième partie, classe de Première.

Un moteur spécial assure la pression de l'huile des paliers fluides. La meule n'est mise en mouvement que lorsque cette pression, enregistrée par un manomètre, est atteinte.

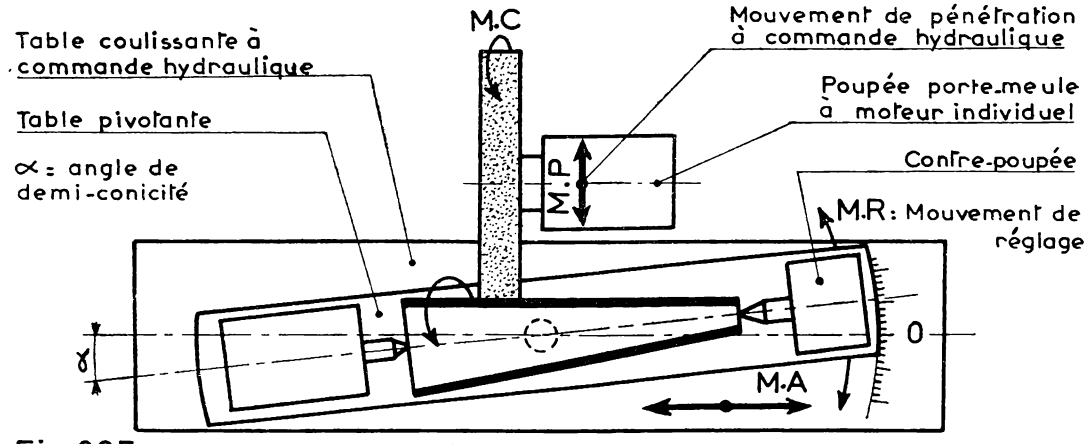


Fig:297– Position de la table pivotante pour rectification conique d'une pièce montée entre pointes.

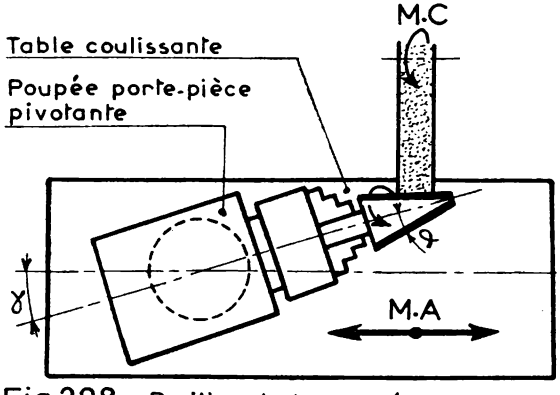


Fig:298– Position de la poupée pour rectification conique d'une pièce montée en l'air.

I. — RECTIFICATION EN PLONGÉE

A. PRINCIPE.

L'équipement comprend trois éléments fonctionnels (fig. 299) :

— **la meule de travail** (vitesse de coupe : 30 à 35 *m/s*);

Rectification sans centres

Lorsque les pièces ne présentent pas de centres ou lorsqu'elles ne peuvent être montées en l'air, ce qui revient au même, on pratique la **rectification sans centres** sur des machines spéciales dites *centerless*. La rectification y est faite soit en plongée, soit à l'enfilade.

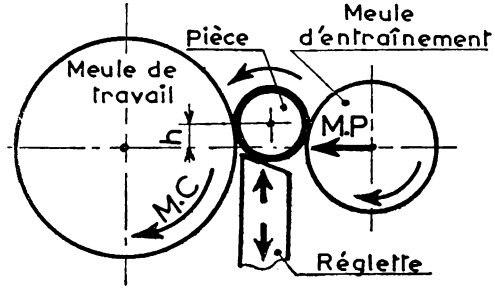


Fig:299– Principe de la rectification sans centres en plongée.

— **la meule d'entraînement,** de composition spéciale, parfois revêtue de caoutchouc. Elle n'attaque pas la pièce (vitesse périphérique : 4 à 20 *m/mn*);

— **la réglette support de pièce,** taillée en biseau à 60°. La partie en contact avec la pièce est très dure (carbure métallique) et très lisse.

Les deux meules ont leurs axes parallèles et tournent dans le même sens. La pièce tourne donc en sens contraire. La meule d'entraînement a un déplacement radial suivant **MP** pour assurer la pénétration de la meule de travail. La pièce est placée entre les deux meules. Son centre est situé au-dessus de la ligne des centres des meules, à une hauteur **h** égale sensiblement :

— à 0,5 **d** pour les pièces de diamètre $\mathbf{d} < 15$ *mm*;

— à 0,2 **d** + 4 *mm* pour $\mathbf{d} \geqslant 15$ *mm*.

B. ÉQUILIBRE ET ENTRAINEMENT DE LA PIÈCE (fig. 300).

Pour que la meule de travail remplisse son rôle, il faut qu'elle *glisse* sur la pièce et, par suite, qu'elle ne l'entraîne que faiblement. C'est la meule dite d'entraînement qui a pour but de limiter la vitesse de rotation de la pièce.

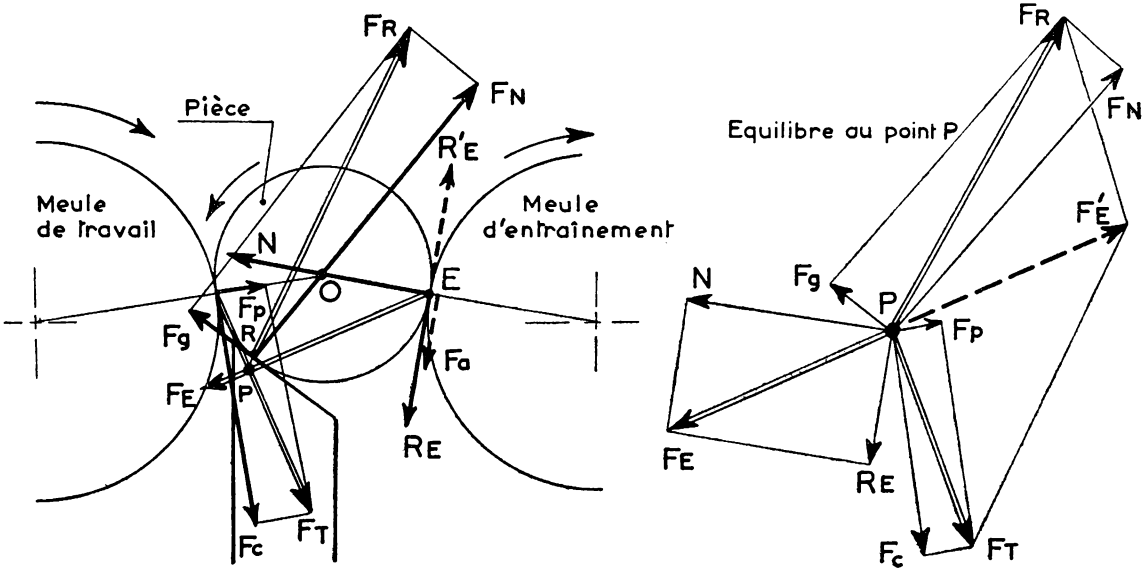


Fig:300 – Equilibre et entraînement de la pièce en rectification sans centres.

La pièce, dont nous négligerons le poids, prend appui sur les deux meules et sur la réglette. Elle est en équilibre sous l'action des forces qui lui sont appliquées par ces trois contacts. La force $\mathbf{F}_R$, action de la réglette, est la résultante de la réaction de contact $\mathbf{F}_N$ et de la force de

frottement de glissement $\mathbf{F}_g$. La force $\mathbf{F}_T$, action de la meule de travail, est la résultante de l'effort de coupe $\mathbf{F}_C$ et de l'effort de pénétration $\mathbf{F}_P$. Ces deux forces se coupent en **P**. La force $\mathbf{F}_E$, action de la meule d'entraînement, équilibre obligatoirement les forces $\mathbf{F}_E$ et $\mathbf{F}_T$ et sa droite d'action passe donc par **P**. Cette force $\mathbf{F}_E$ résulte de l'action normale **N** de la meule sur la pièce et de la force $\mathbf{R}_E$ tangentielle suivant laquelle la meule d'entraînement retient la pièce sollicitée en rotation par la meule de travail.

La pièce agit donc en définitive tangentiellement sur la meule d'entraînement suivant $\mathbf{R}'_E$ et la force d'adhérence tangentielle appliquée en **E** est $\mathbf{F}_a = \mathbf{N} \times f$. Si la force $\mathbf{R}'_E$ est supérieure à cette adhérence $\mathbf{F}_a$, la pièce tourne trop vite, car elle glisse sur la meule d'entraînement qui ne la retient pas suffisamment, et la meule de travail n'agit pas dans de bonnes conditions. Si, au contraire, la force $\mathbf{R}'_E$ est inférieure à l'adhérence $\mathbf{F}_a$, la pièce ne peut pas glisser en **E** et sa vitesse périphérique est limitée à celle de la meule d'entraînement qui a été préalablement déterminée.

Le réglage de la position de la face d'appui de la réglette permet de modifier les valeurs relatives de $\mathbf{R}'_E$ et de $\mathbf{F}_a$ et, par suite, de donner à la pièce la vitesse de rotation prévue.

C. EXEMPLES DE TRAVAUX RÉALISÉS PAR RECTIFICATION EN PLONGÉE.

Pour la rectification en plongée d'extrémités sur pièces longues (fig. 301-1), il faut soutenir la pièce par deux galets.

Lorsque la rectification est cylindrique et pour obtenir un meilleur état de surface et une usure plus régulière des meules, il est bon d'animer la meule de travail d'un mouvement de balayage d'environ 1 *mm* à la fréquence de 30 allers et retours par minute (fig. 301-2).

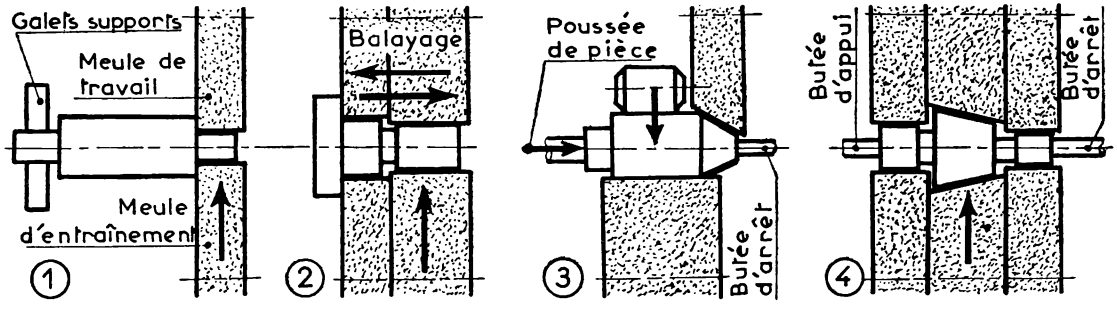


Fig.301- Exemples de pièces rectifiées par travail en plongée.

Dans certains cas (fig. 301-3), il n'y a pas plongée proprement dite, mais poussée axiale de la pièce par une extrémité.

Pour la rectification de forme (fig. 301-3 et 4), les meules sont taillées au profil à obtenir.

D. RECTIFICATION INTÉRIEURE CYLINDRIQUE SANS CENTRES

Un galet support et un galet presseur maintiennent et appuient la pièce contre la meule d'entraînement dont l'axe est fixe (fig. 302). C'est la meule de travail qui a le mouvement de pénétration.

La rectification extérieure préalable de la pièce est évidemment nécessaire.

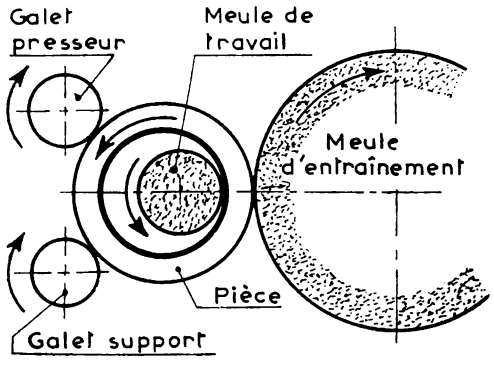


Fig:302 – Rectification cylindrique sans centres.

La principale application de ce procédé est la rectification intérieure de bagues demandant une concentricité très précise.

II. — RECTIFICATION A L'ENFILADE

A. PRINCIPE DE LA TRANSLATION DES PIÈCES

Lorsque les pièces sont rectifiées à un même diamètre sur toute leur longueur, on pratique la **rectification à l'enfilade,** c'est-à-dire qu'elles passent les unes à la suite des autres entre les meules. C'est la meule d'entraînement qui assure l'avancement axial des pièces (fig. 303-1). Pour remplir ce rôle, son axe est incliné sur celui de la meule de travail d'un angle $\alpha = 3$ à $5°$, et elle doit s'appuyer entièrement sur la pièce suivant une génératrice rectiligne. Son profil est donc un hyperboloïde de révolution.

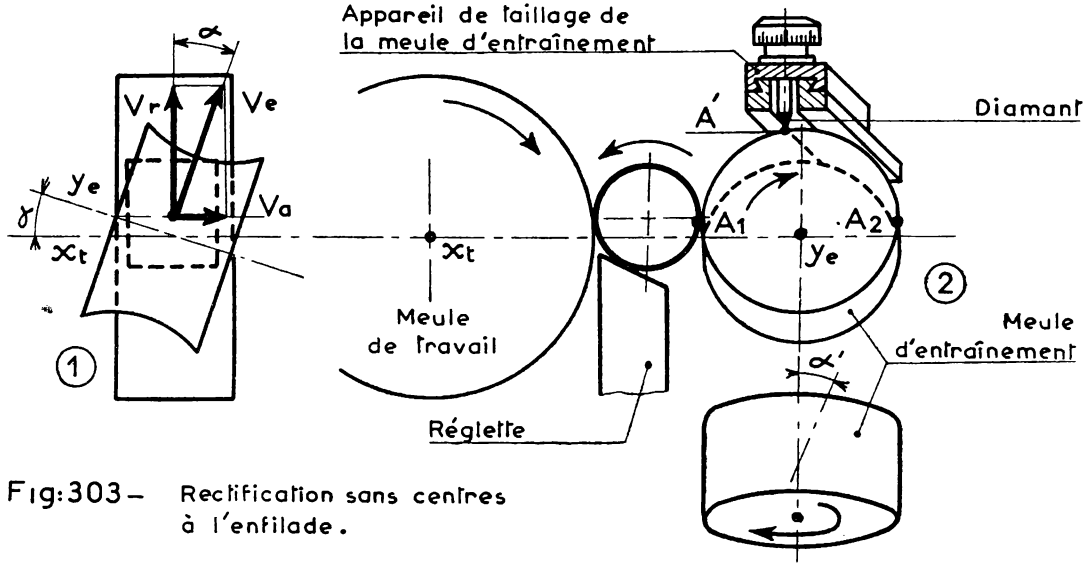


Fig:303 – Rectification sans centres à l'enfilade.

Le vecteur vitesse $\mathbf{V}_e$ de la meule d'entraînement se réduit en un vecteur vitesse de rotation de la pièce $\mathbf{V}_r$ et un vecteur vitesse d'avancement axial $\mathbf{V}_a$. On a :

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{V}_e \cos \alpha \simeq \mathbf{V}_e \text{ car } \alpha \text{ est petit;}$$
$$\mathbf{V}_a = \mathbf{V}_e \sin \alpha = 2 \text{ à } 5 \ m/mn$$

La taille de la meule d'entraînement pourrait être obtenue par déplacement d'un diamant en $\mathbf{A}_1$ ou en $\mathbf{A}_2$ parallèlement à l'axe de la meule de travail (fig. 303-2). En pratique, le diamant se déplace en $\mathbf{A}'$ suivant une trajectoire qui dépend de l'angle α' dont la valeur est liée à celle de α, c'est-à-dire que la trajectoire en $\mathbf{A}_1$ a tourné de 90° autour de l'axe $\mathbf{y}_e$ de la meule d'entraînement. Une vis micrométrique contrôle la profondeur de passe prise par le diamant. Un dispositif analogue permet le taillage de la meule de travail suivant une trajectoire parallèle à son axe.

B. TRAVAUX DE RECTIFICATION A L'ENFILADE

Ce procédé de fabrication convient très bien pour des petites pièces telles que galets, axes, rouleaux, ou pour des barres calibrées (genre acier Stub).

Les pièces courtes (fig. 304-1) sont mises dans une goulotte et elles sont guidées à leur entrée et à leur sortie des meules par des guides latéraux.

Les pièces longues (fig. 304-2) sont supportées et guidées par des galets.

Dans tous les cas, plusieurs passes sont nécessaires pour amener les pièces à la cote finale.

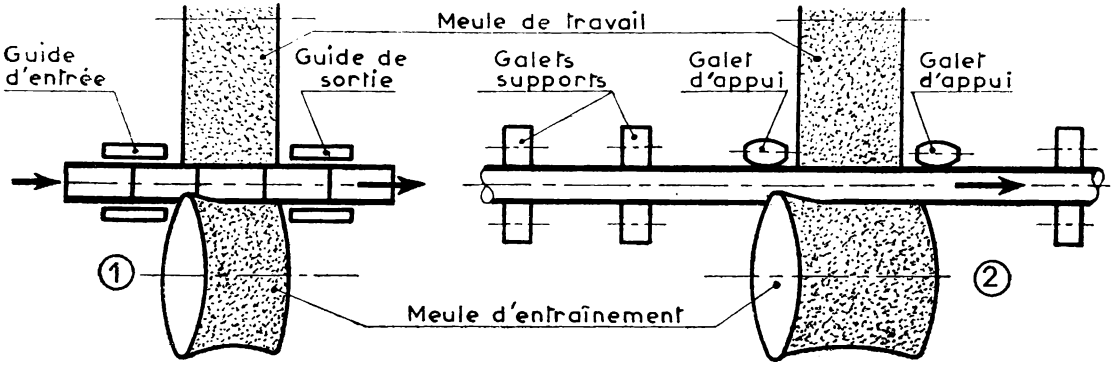


Fig:304- Rectification sans centres à l'enfilade
(1) De pièces courtes. (2) De pièces longues.

LES TRAVAUX DE RODAGE ET DE SUPERFINITION

I. — GÉNÉRALITÉS

Les exigences d'homogénéité de fonctionnement et de grande durée des mécanismes imposent, en construction mécanique, des jeux de fonctionnement très petits et une haute précision de fabrication. En ce qui concerne les arbres et les alésages principalement, la rectification usuelle ne permet pas d'atteindre ce double but. Elle laisse en effet des facettes et des rugosités trop profondes (1 à 2 μ en rectification courante). De plus, la surface rectifiée présente une couche extérieure altérée par le grand échauffement dû à l'arrachement du copeau. Cette couche, dite couche de Beilby, qui peut atteindre de 3 à 5 μ ne possède plus les propriétés mécaniques du métal de base.

Le rodage et la superfinition font disparaître la couche de Beilby et diminuent les rugosités laissées par la rectification courante.

II. — RODAGE

A. PRINCIPE DU RODAGE

Les grains d'abrasifs sont incrustés dans un corps de forme, ou **rodoir,** et entraînés par lui suivant des trajectoires qui se recouvrent (fig. 305) : trajectoire en 8 pour les surfaces planes, en hélice pour les surfaces cylindriques.

En utilisant des grains de plus en plus fins, de grosseur 60 à 800, on fait disparaître les rugosités laissées par le façonnage précédent pour arriver finalement à des rugositées de 0,1 à 0,2 μ de profondeur. Au départ, la réserve de rodage a une épaisseur de 10 à 30 μ.

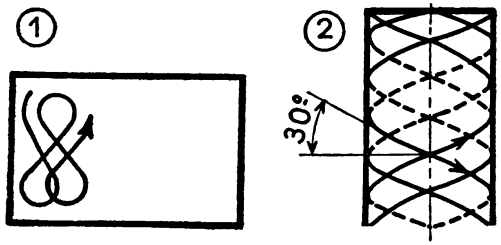


Fig:305 – Trajectoires de rodage
(1) en forme de 8 pour surfaces planes
(2) en hélice pour surfaces cylindriques

La vitesse de coupe est faible, 20 *m/mn* environ. Ceci pour éviter l'échauffement dans la région rodée et pour que le métal soit coupé et non arraché.

La pression de rodage varie entre 1 et 8 kg/cm^2. Une abondante lubrification est nécessaire pour évacuer les débris du rodage et refroidir la pièce. On recommande le gas-oil pour la fonte, le pétrole pour l'acier trempé et l'huile de coupe légère pour la fonte et les métaux tendres.

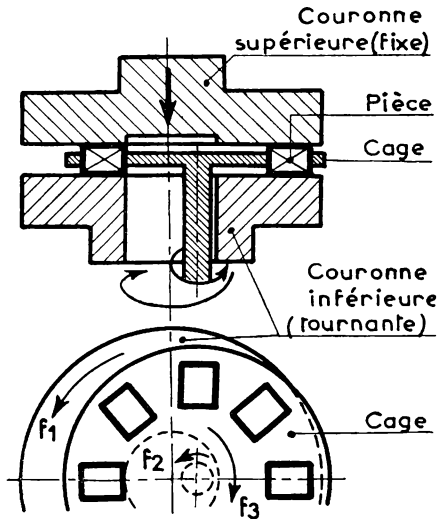
Le rodage corrige surtout les défauts micro-géométriques. Il n'est donc efficace que pour des surfaces sans défauts de forme.

B. RODAGE MÉCANIQUE PLAN

Les pièces sont logées dans les évidements de forme d'un plateau entraîneur ou cage, qui les maintient et les guide entre deux couronnes rodoirs (fig. 306). Les couronnes, parfaitement planes, sont en fonte et garnies de pâte abrasive.

Seule la couronne inférieure est en rotation suivant f_1. La cage tourne dans le même sens autour de son axe — flèche f_2 — en même temps qu'en sens inverse autour de l'axe des couronnes suivant f_3. Les deux rotations de la cage déterminent un mouvement en 8 des pièces par rapport aux couronnes qui sont balayées sur toute leur surface par les pièces. Ainsi, les couronnes conservent plus longtemps leur planéité.

Les pièces à roder sont préalablement triées et introduites dans la machine par épaisseur identique.



Vue de dessus, couronne supérieure enlevée.

Fig:306- Schéma d'une machine à roder les surfaces planes.

C. RODAGE EXTÉRIEUR DES PIÈCES CYLINDRIQUES

Pour les pièces cylindriques, la cage présente des logements inclinés par rapport aux rayons (fig. 307). Elle est folle sur son arbre et au cours du rodage, les pièces frottent et roulent à la fois sur les rodoirs. Il en résulte que la cage se trouve entraînée en rotation.

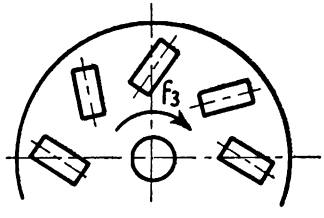


Fig:307- Cage pour rodage de pièces cylindriques.

D. RODAGE INTÉRIEUR CYLINDRIQUE

Le corps du rodoir maintient les porte-pierres à l'aide de ressorts agissant sur un système articulé. Les pierres sont fixées au porte-pierre et déterminent le cylindre d'action abrasive. Un réglage en marche agit sur le système articulé pour compenser l'usure des pierres (fig. 308).

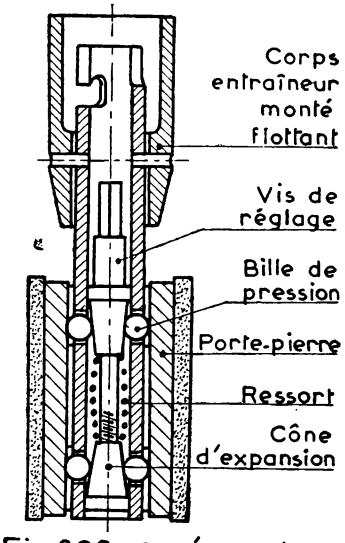


Fig:308- Schéma d'un rodoir "Truba" expansible en marche.

L'outil a une vitesse de translation de 20 *m/mn* et la vitesse de coupe peut atteindre 40 *m/mn* car la lubrification se fait dans de bonnes conditions.

Le rodoir est monté flottant sur la broche de la machine afin qu'il se centre de lui-même.

En rodage intérieur, les défauts d'ovalisation sont corrigés mais les défauts importants de rectitude de la génératrice subsistent.

Le glaçage des surfaces, ou poli-miroir, est obtenu par l'emploi de poudre n° 800.

III. — SUPERFINITION

Les pierres, constituées par des poudres très fines (jusqu'au n° 800) sont taillées au diamant au même diamètre ou à la même forme que les surfaces à traiter (fig. 309 et 310). Leur pression d'appui varie de 1 à 5 kg/cm^2.

Les trois mouvements relatifs pièce-outil sont :

— rotation de la pièce à une vitesse de coupe de 20 *m/mn*;

— vibration des pierres à raison de 1 000 à 2 000 coups-minute sur une course de 3 à 5 *mm* pour l'ébauche et 1 à 2 *mm* pour la finition, suivant une génératrice de la surface;

— déplacement rectiligne des pierres sur toute la longueur de la surface suivant une de ses génératrices.

Au début du travail, les pierres s'appuient sur les sommets des rugosités qui disparaissent assez rapidement. Au fur et à mesure de leur disparition, la surface de contact augmente et la pression devient insuffisante pour entretenir la coupe. Lorsque la surface est parfaitement lisse, l'opération s'arrête d'elle-même.

Les vibrations à grande fréquence des pierres engendrent des recouvrements de contacts nombreux. De plus, leur forme taillée et leur faible pression de contact assurent des surfaces superfinies exemptes de facettes et dont la profondeur des sillons est de l'ordre de 0,1 μ.

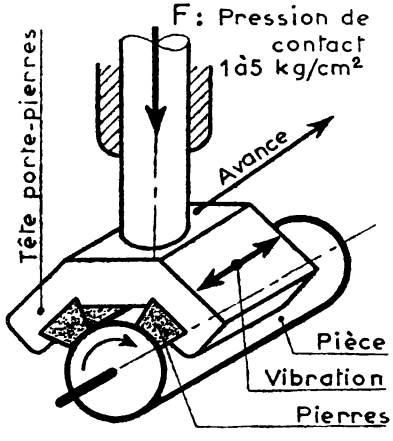


Fig. 309 - Schéma d'une tête à superfinir "Gisholt"

Une lubrification abondante est nécessaire, soit au pétrole, soit à l'huile, soit par un mélange de ces liquides.

A. OPÉRATIONS DE SUPERFINITION

La superfinition se pratique sur des pièces montées entre pointes ou en l'air. Les machines ont l'allure d'une rectifieuse cylindrique sur laquelle le porte-meule est remplacé par l'appareil à superfinir. Pour la superfinition extérieure, certaines têtes porte-pierres, la tête Gisholt par exemple (fig. 309), se montent même sur tour parallèle.

Des machines spéciales permettent la superfinition sans centres (fig. 310). L'entraînement des pièces est produite par des cylindres entraîneurs. Si les pièces sont courtes, il est possible d'en monter plusieurs simultanément.

B. COMPARAISON DE SURFACES RECTIFIÉES ET SUPERFINIES

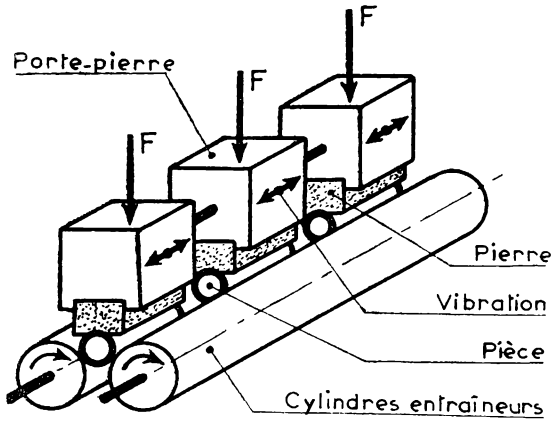


Fig:310 – Superfinition "Centerless"

La figure 311 fait ressortir le degré de fini obtenu par les deux procédés.

Les surfaces frottantes superfinies sont pratiquement inusables.

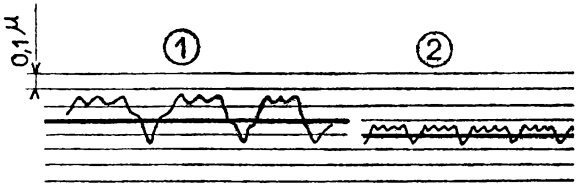


Fig:311 – Comparaison d'états de surface:
① - Rectifiée en finition
② - Superfinie

IV. — RECTIFICATION FINE

En construction mécanique de haute précision, on substitue souvent et avec avantage la rectification fine à la superfinition car on arrive à des résultats sensiblement égaux du point de vue fini de surface et supérieurs du point de vue correction géométrique.

Après rectification courante laissant une surépaisseur de 5 à 10 μ, on utilise des meules à grain de plus en plus fin pour finir avec le grain indice 500. Mais il faut opérer sur des rectifieuses de haute qualité pouvant assurer une profondeur de passe de l'ordre de 0,5 μ.

Les copeaux devenant de plus en plus petits, il s'ensuit :

— des efforts de coupe très faibles, d'où suppression de la déformation par flexion des pièces ;

— un contact meule-pièce très court, d'où suppression des facettes ;

— un échauffement nul car le liquide absorbe complètement et rapidement les calories produites, d'où disparition de la couche de Beilby initiale sans qu'une nouvelle couche prenne naissance.

LES TRAVAUX D'AFFUTAGE

GÉNÉRALITÉS

L'affûtage des outils, qui conditionne au prime abord les meilleures conditions de coupe et, par suite, de qualité de façonnage et de productivité, a été trop longtemps négligé et n'est pas toujours conduit rationnellement. C'est une erreur de le laisser au jugement empirique et au doigté de l'exécutant — même le plus adroit — alors que l'étude expérimentale a permis d'établir les angles caractéristiques optima dont les machines à affûter assurent le respect intégral.

L'outil mal affûté est à l'origine des efforts de coupe importants qui fatiguent la machine, déforment la pièce, échauffent le contact. Sa durée est faible, son rendement très insuffisant, les surfaces qu'il produit ne présentent aucune homogénéité ni dans les formes ni dans les dimensions.

Mais le respect des angles d'affûtage ne suffit pas, il faut aussi que les surfaces actives de l'outil soient parfaitement finies. L'affûtage se fera donc en deux temps :

— ébauche avec des meules à gros grains;

— finition avec des meules à grains fins ou, pour les carbures métalliques, avec meules diamantées.

AFFUTAGE DES OUTILS DE TOURNAGE ET DE RABOTAGE

I. — ÉLÉMENTS D'UN OUTIL DE COUPE

Les différents éléments qui caractérisent un outil de tournage et de rabotage sont les suivants (fig. 312) :

A. ÉLÉMENTS FONCTIONNELS CONNUS

Ils ont été étudiés en classe de 2e et de 3e. Nous les rappelons brièvement.

1° Éléments de mise en place.

Ils doivent assurer une position identique de l'outil à chacun de ses montages sur la machine.

— **Plan de base.** Il doit être géométriquement correct, donc usiné;

— **Génératrice du corps.** Elle est matérialisée par une droite parallèle au plan de base et contenue dans une face du corps perpendiculaire au plan de base. Cette face doit donc être usinée elle aussi.

2° Éléments de forme de la partie active.

Ils sont définis par l'opération d'usinage à réaliser.

— **Profil de l'outil.** C'est la projection de l'arête coupante sur le plan de base. Il peut être rectiligne ou de forme quelconque.

— **Obliquité du profil.** Elle est déterminée par l'angle γ. De sa valeur dépend la position de la surface tranchée par rapport à la surface engendrée.

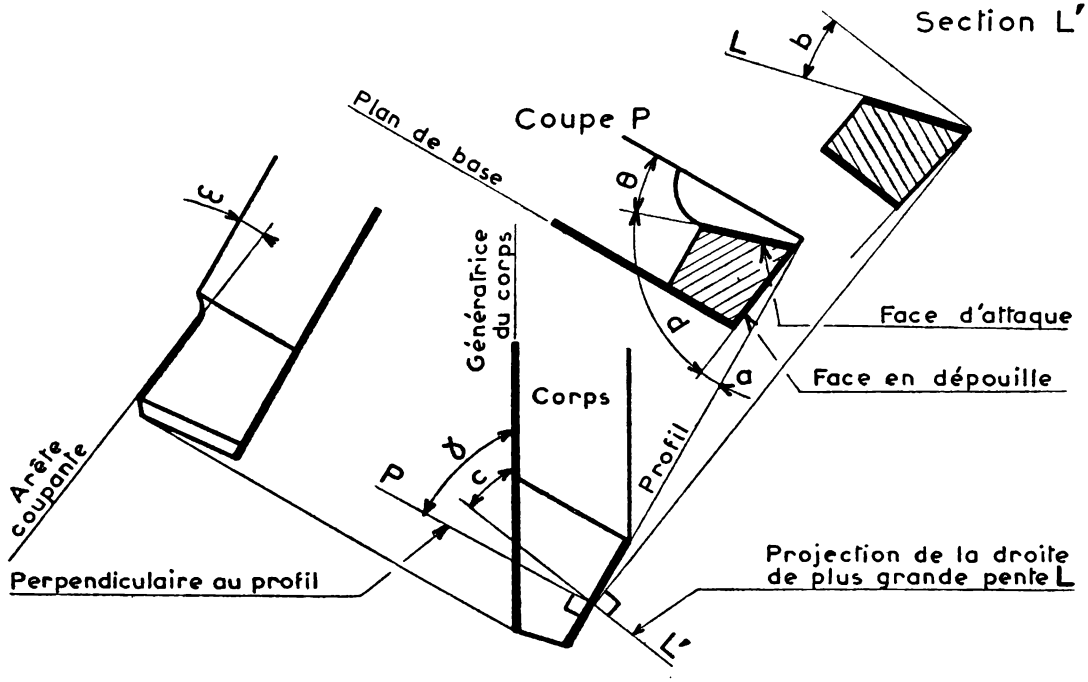


Fig:312- Eléments d'un outil de coupe pour tournage et rabotage.

3° Éléments de coupe.

Ils assurent le détachement du copeau dans les conditions optima.

— **Angle de dépouille a.** Sa valeur est à peu près constante (4 à 6°).

— **Angle de pente effective de coupe** θ. Il varie d'après la nature du métal à usiner, la nature du matériau à outil et de certaines conditions particulières d'usinage.

— **Obliquité de l'arête coupante** ω. On établit une arête oblique si l'on veut diriger le copeau lors de son écoulement. Si $\omega = 0$, l'arête est parallèle au plan de base et dite normale.

B. ÉLÉMENTS DE FABRICATION-AFFUTAGE DE LA FACE D'ATTAQUE A DÉTERMINER (Fig. 312).

Les angles γ θ et ω, qui sont fixés par l'utilisateur en fonction des conditions de coupe particulières à l'opération d'usinage envisagée, ne se prêtent pas commodément au réglage de la machine à affûter. Ils définissent d'ailleurs assez mal la position de la face d'attaque par rapport au plan de base et à une génératrice du corps de l'outil.

Au contraire, la droite de plus grande pente, par l'angle **b** qu'elle fait avec le plan de base et par l'angle **c** que sa projection sur ce même plan de base fait avec la génératrice du corps, définit parfaitement et simplement la face d'attaque. Il a donc fallu définir ces angles **b** et **c** et les substituer, en les calculant, aux angles γ, θ et ω.

Le réglage du porte-outil de l'affûteuse par rapport au plan de travail de la meule ne se fera en définitive qu'à partir des angles b et c.

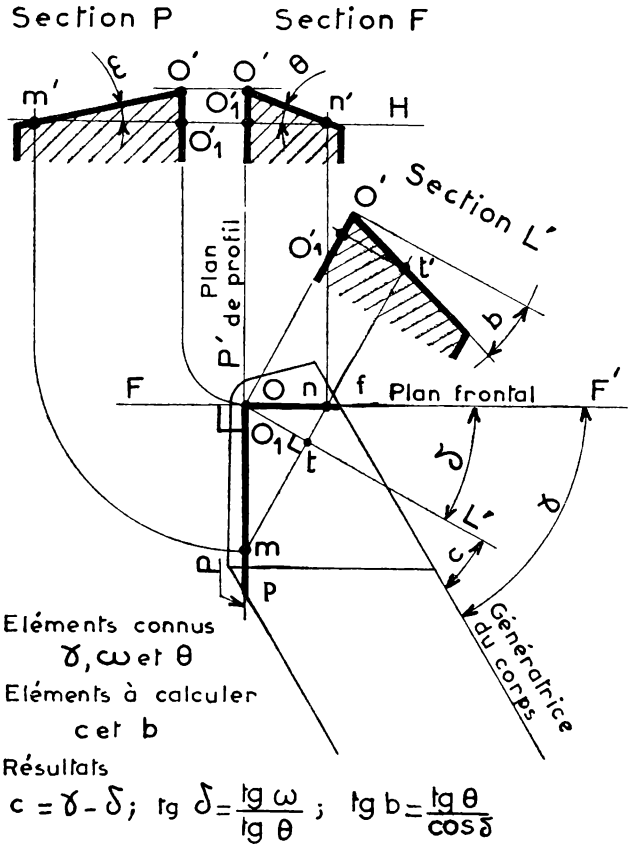


Fig:313— Valeur des éléments de fabrication et d'affûtage de la face d'attaque d'un outil de tournage et de rabotage.

— **Angle de direction c.** C'est l'angle formé par la projection **L'** de la droite de plus grande pente **L** et une génératrice du corps.

— **Angle de pente d'affûtage b.** C'est l'angle aigu que fait la face d'attaque avec le plan de base. Il est formé par la droite de plus grande pente et le plan de base.

Détermination de la valeur des angles b et c.

Considérons l'outil à charioter à droite dont le contour est tracé en trait fin (fig. 313) et coupons-le par le **plan de profil** de trace **PP'** et par le plan frontal de trace **FF'**. Les sections **Op** et **Of** déterminent le plan de la face d'attaque. Coupons-le par un plan horizontal **H** et soit **mn** l'horizontale appartenant à ce plan **H**. Les points **m** et **n** sont à la même hauteur **h** du plan de base de l'outil et la droite **OL'**, perpendiculaire à **mn** est la projection de la droite de plus grande pente de la face d'attaque par rapport au plan de base de l'outil.

Les projections des sections **F**, **P** et **L'** font apparaître les angles θ et ω connus ainsi que **b** inconnu.

L'examen de la figure 313 montre que $\boxed{c = \gamma - \delta}$ et que $\text{tg}\ \delta = \dfrac{tn}{ot} = \dfrac{on}{om}$.

Mais $on = o_1'n' = \dfrac{o'o_1'}{\text{tg}\ \theta}$ (triangle $o'o_1'n'$) et $om = o_1'm' = \dfrac{o'o_1'}{\text{tg}\omega}$ (triangle $o'o_1'm'$).

Par suite : $\boxed{\text{tg}\ \delta = \dfrac{\text{tg}\ \omega}{\text{tg}\ \theta}}$ d'où la valeur de δ et celle de $c = \gamma - \delta$.

Si l'obliquité de l'arête était négative, la figure 314 montre qu'on aurait $\boxed{c = \gamma + \delta}$

2° Valeur de l'angle b.

La section L' (fig. 313) montre que $\text{tg}\ b = \dfrac{o'o_1'}{o_1't'}$ Mais $o'o_1' = o_1'n' . \text{tg}\ \theta$ (triangle $o'o_1'n'$) et $o_1't' = ot = on . \cos\delta$ (triangle otn). Comme $o_1'n' = on$, on a $\boxed{\text{tg}\ b = \dfrac{\text{tg}\ \theta}{\cos\delta}}$, d'où la valeur de b.

Remarques. 1° Pour un outil dont l'arête ne présente pas d'obliquité, on a $\delta = 0$, d'où $c = \gamma$ et $\text{tg}\ b = \dfrac{\text{tg}\ \theta}{1} = \text{tg}\ \theta$.

2° Les formules générales établies ci-dessus sont valables quel que soit l'outil.

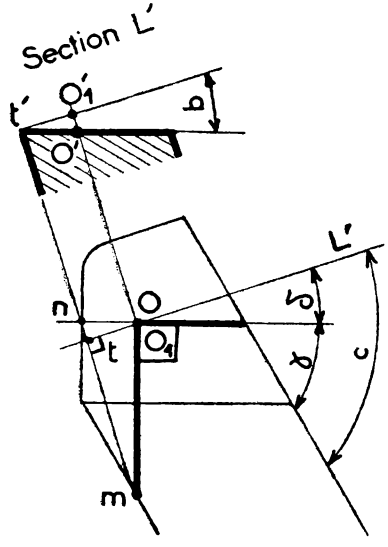


Fig:314- Valeur de c lorsque l'obliquité est négative.

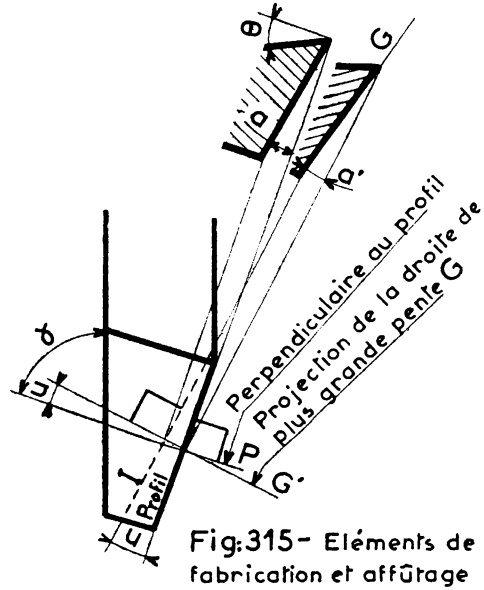
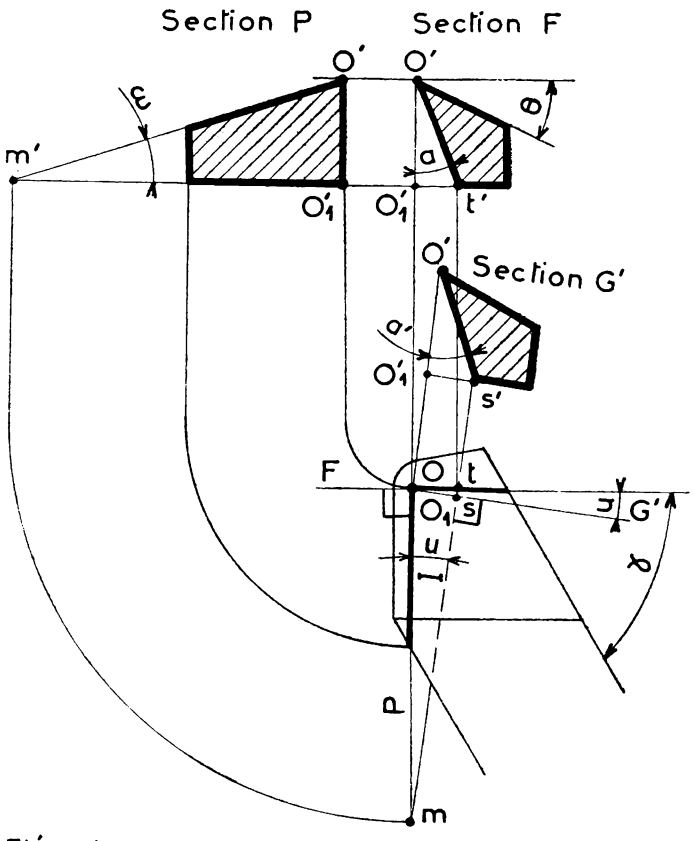


Fig:315- Eléments de fabrication et affûtage de la face en dépouille d'un outil de tournage et de rabotage.

C. ÉLÉMENTS DE FABRICATION-AFFUTAGE DE LA FACE EN DÉPOUILLE A DÉTERMINER.

Considérons l'outil figure 315 dont l'obliquité d'arête est positive. L'angle de dépouille effective de coupe **a** est l'angle formé par la perpendiculaire au plan de base et la section de la face en dépouille suivant le plan **P** perpendiculaire à la projection du profil.



Eléments connus : a ω
Eléments à calculer : u a'
Résultats : tg u = tg a . tg ω ; tg a' = cos u . tg a .

Fig:316- Valeur des éléments de fabrication et d'affûtage de la face en dépouille d'un outil de tournage et de rabotage.

Pour affûter l'outil sur sa face en dépouille, il faut placer la droite de plus grande pente **G** contenue dans cette face dans le plan de travail de la meule.

Or, la droite de plus grande pente **G** est perpendiculaire à l'intersection **I** du plan de base et de la surface en dépouille, et sa projection **G'** l'est aussi.

Le problème de l'affûtage de la face en dépouille consiste donc à positionner l'outil en respectant l'angle **a'** de plus grande pente et l'angle **u** qui est l'angle de direction de la face en dépouille. Pour une valeur constante de l'angle **a**, l'angle **u** varie suivant l'angle d'obliquité de l'arête coupante ω.

1° Valeur de l'angle u.

La figure 316 représente les sections de l'outil par le plan frontal **F**, le plan de profil **P** et le plan **G'** contenant la droite de plus grande pente de la face en dépouille. L'arête coupante et l'horizontale **I** se coupent en **m** et le plan de la face en dépouille est défini par le triangle **otm.**

On a : $\text{tg } \mathbf{u} = \dfrac{\mathbf{ot}}{\mathbf{om}}$ (triangle **otm**).

Mais $\mathbf{ot} = \mathbf{o'_1t'} = \mathbf{o'o'_1}.\text{tg } \mathbf{a}$ (triangle $\mathbf{o'o'_1t'}$) et $\mathbf{om} = \mathbf{o'_1m'} = \dfrac{\mathbf{o'o'_1}}{\text{tg } \omega}$ (triangle $\mathbf{o'o'_1 m'}$).

Par suite : $\boxed{\text{tg } \mathbf{u} = \text{tg } \mathbf{a}.\text{tg } \omega}$ d'où la valeur de **u.**

Si l'obliquité d'arête était négative, le produit tg $\mathbf{a}$. tg ω serait négatif et l'angle $\mathbf{u}$ serait reporté à gauche de $\mathbf{om}$

2° Valeur de l'angle a'.

On a : tg $\mathbf{a}' = \dfrac{\mathbf{o}'_1\mathbf{s}'}{\mathbf{o}'_1\mathbf{o}'}$ (triangle $\mathbf{o}'\mathbf{o}'_1\mathbf{s}'$).

Mais $\mathbf{o}'_1\mathbf{s}' = \mathbf{os} = \mathbf{ot}\cos\mathbf{u}$ (triangle $\mathbf{ots}$) et $\mathbf{o}'\mathbf{o}'_1 = \dfrac{\mathbf{o}'_1\mathbf{t}'}{\text{tg } \mathbf{a}} = \dfrac{\mathbf{ot}}{\text{tg } \mathbf{a}}$ (triangle $\mathbf{o}'\mathbf{o}'_1\mathbf{t}'$).

Par suite : $\boxed{\text{tg } \mathbf{a}' = \cos \mathbf{u} \text{ tg } \mathbf{a}}$ d'où la valeur de $\mathbf{a}'$.

Remarques. 1° Pour un outil dont l'arête ne présente pas d'obliquité, tg $\mathbf{u} = 0$ et tg $\mathbf{a}' =$ tg $\mathbf{a}$.

2° Les formules générales établies ci-dessus sont valables quel que soit l'outil.

II. — POSITIONNEMENT DE L'OUTIL POUR SON AFFUTAGE

A. AFFUTAGE DE LA FACE D'ATTAQUE.

La figure 317 en est l'illustration.

1. Au départ, l'outil occupe une position telle que son plan de base (plan $\mathbf{h}$) et le plan de travail de la meule $\mathbf{T}$ sont parallèles à un plan horizontal $\mathbf{H}$ qui contient le mouvement d'avance $\mathbf{MA}$ de l'outil au cours de son affûtage. La génératrice du corps est parallèle à $\mathbf{MA}$ qui est perpendiculaire à l'axe de la meule.

2. Autour d'un axe vertical 1, faire pivoter l'outil dans le plan $\mathbf{h}$ de l'angle $\mathbf{c} = \gamma - \delta$ qu'on a calculé. La vue de dessous de 2 montre que la droite de plus grande pente $\mathbf{L}$ est oblique au plan de travail $\mathbf{T}$, mais que sa projection $\mathbf{L}'$ est parallèle à $\mathbf{MA}$.

3. Autour d'un axe horizontal 2, faire pivoter l'outil de l'angle $\mathbf{b}$ qu'on a calculé. La droite de plus grande pente $\mathbf{L}$ est alors parallèle au plan de travail $\mathbf{T}$ et à $\mathbf{MA}$ et la face d'attaque est parallèle au plan de travail. Mais la vue de dessus de 3 montre que la limite de la face d'attaque est oblique à $\mathbf{MA}$.

4. Autour d'un axe vertical 3 (perpendiculaire au plan $\mathbf{H}$), faire pivoter l'outil de l'angle δ' pour amener la limite de la face d'attaque parallèle à $\mathbf{MA}$. On établira facilement la relation : tg $\delta' =$ tg δ . cos $\mathbf{b}$.

L'outil est en position d'affûtage.

Conséquences. La machine à affûter devra posséder un support direct de l'outil mobile autour d'un axe vertical et autour d'un axe horizontal et cet ensemble devra ensuite être mobile autour d'un autre axe vertical.

B. AFFUTAGE DE LA FACE EN DÉPOUILLE.

Les différentes positions de l'outil sont données par la figure 318.

1. En position initiale, l'outil a son plan de base $\mathbf{h}$ perpendiculaire au plan de travail $\mathbf{T}$ et parallèle au plan horizontal $\mathbf{H}$ qui contient le mouvement d'avance $\mathbf{MA}$ au cours de l'affûtage. La génératrice du corps est perpendiculaire au plan de travail.

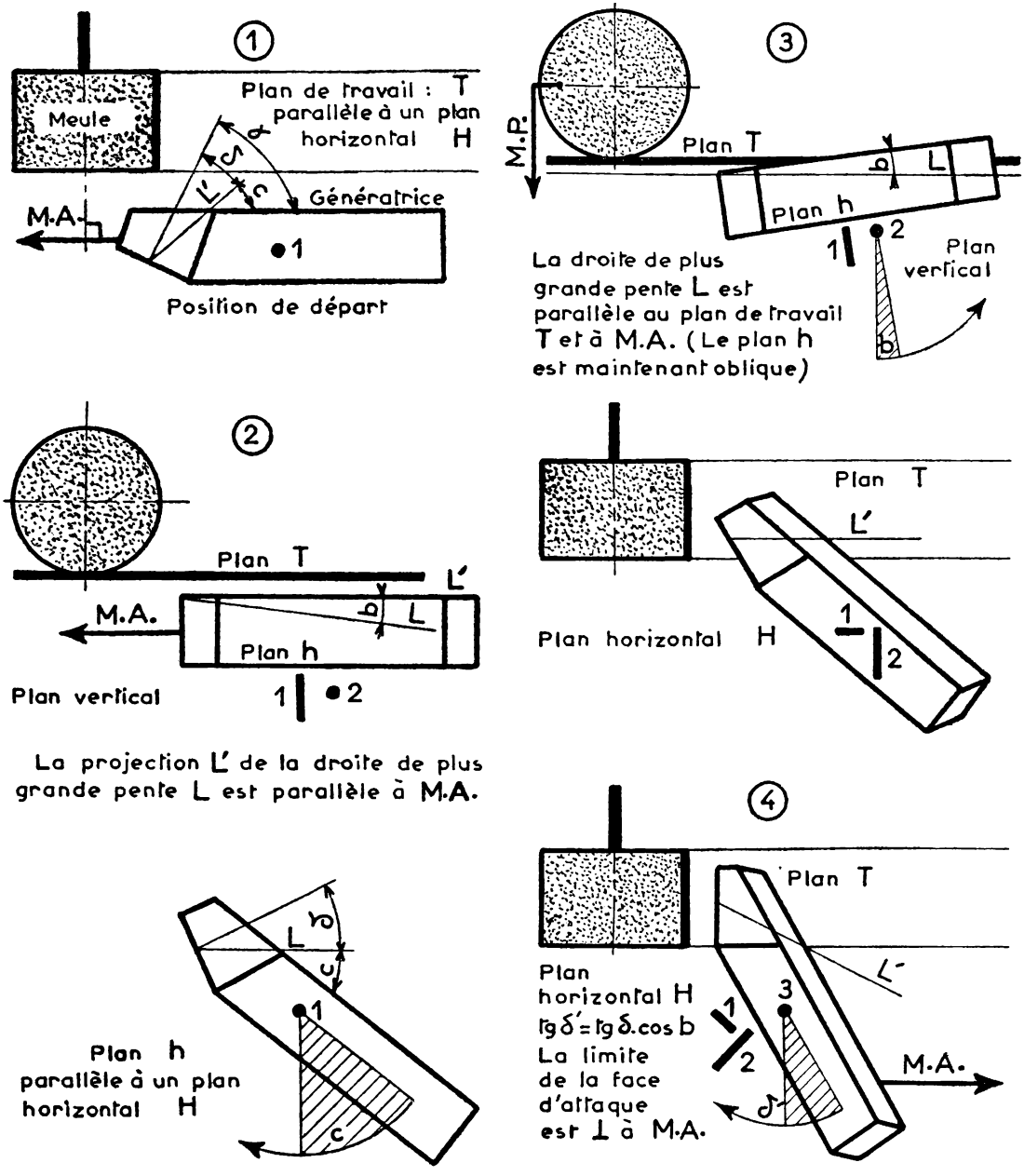


Fig:317– Théorie du positionnement de l'outil pour l'affûtage de la face d'attaque.

2. Autour d'un axe vertical 1 faire pivoter l'outil de l'angle γ.

3. L'obliquité d'arête étant positive en ce cas, faire pivoter l'outil dans le plan **h** autour de l'axe 1 de l'angle **u**. L'intersection de la face en dépouille et du plan de base est alors parallèle au plan de travail et la projection **G'** de la droite de plus grande pente **G** est perpendiculaire à ce plan.

Remarque. Si l'obliquité d'arête était négative, la rotation se ferait en sens contraire.

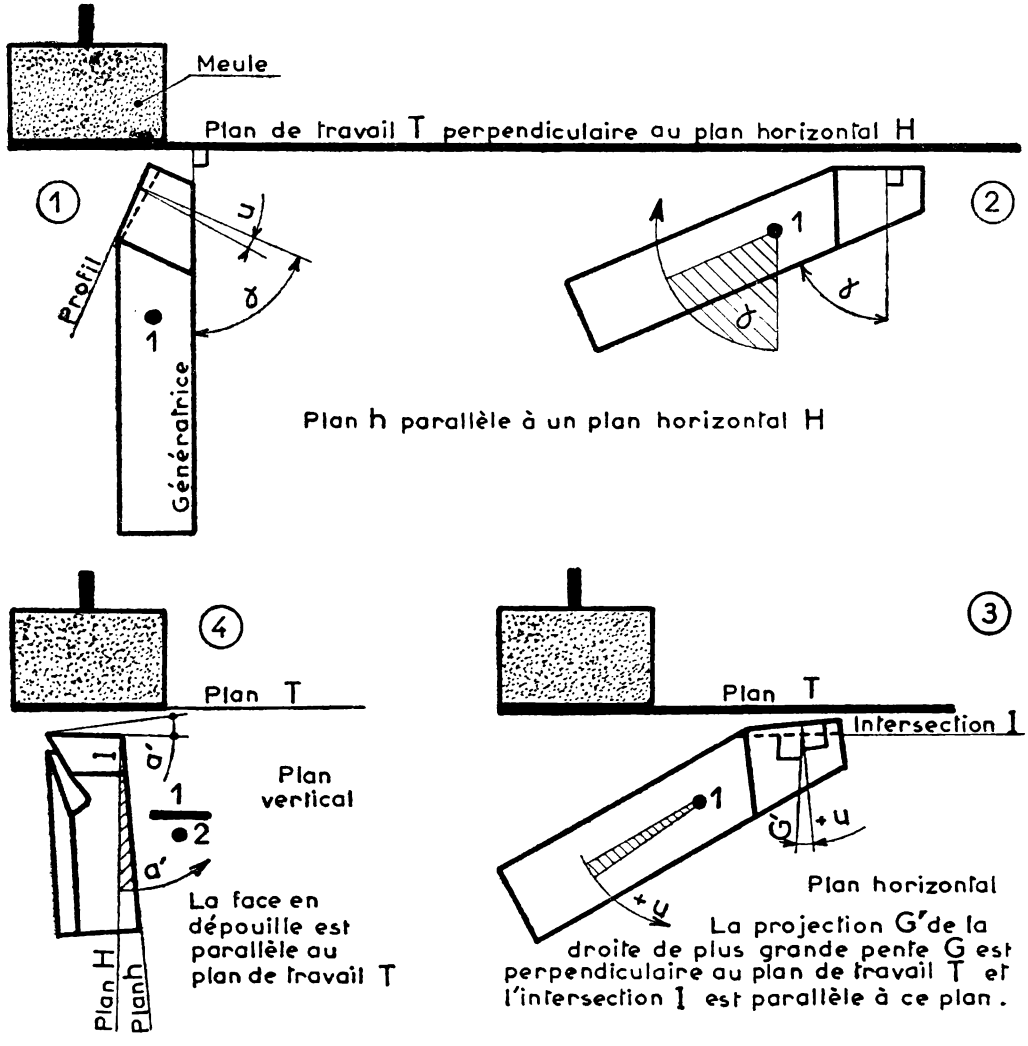


Fig:318- Théorie du positionnement de l'outil pour l'affûtage de la face en dépouille.

4. Dans un plan vertical et autour de l'axe horizontal 2, faire pivoter l'outil de l'angle **a'**. La face en dépouille est alors parallèle au plan de travail et l'outil est en position d'affûtage.

Conséquences. La machine à affûter devra posséder un support direct de l'outil mobile autour d'un axe vertical et autour d'un axe horizontal.

III. — MACHINES A AFFUTER LES OUTILS DE TOURNAGE ET DE RABOTAGE

Nous donnons (fig. 319 page 187) le dispositif principal d'orientation de l'outil de l'affûteuse Constan. Cette machine est très pratique et elle équipe de nombreuses sections d'affûtage.

Le support d'outil, solidaire d'une rotule, est orientable dans toutes les directions. Nous retrouvons les plans **h** et **H** ainsi que les axes 1, 2 et 3 autour desquels les rotations successives amènent l'outil à sa position normale par rapport au plan de travail de la meule.

En plus des mouvements précédents, le traînard peut pivoter de + 15° autour de l'axe horizontal suivant les flèches f_1 et f_2. Cette disposition est commode pour l'obtention d'une dépouille nulle (fig. 320-1 page 188) ou d'une dépouille conique ou encore parallèle (fig. 320-2 et 3).

La figure 321, page 188, montre des positions d'outils par rapport à la meule.

IV. — PARTICULARITÉS POUR L'AFFUTAGE DES OUTILS EN CARBURES METALLIQUES

A. DÉPOUILLE SUPPLÉMENTAIRE (fig. 322).

En plus de la dépouille effective **a**, il faut construire une dépouille a_1 de 4 à 5°. Cette dépouille supplémentaire, qui affecte entièrement le corps en acier mi-dur, est obligatoire. Elle localise l'action de la meule diamantée utilisée à la finition à la seule mise rapportée en carbure métallique. Le meulage de cette dépouille supplémentaire est préalablement exécuté sur des meules en corindon.

L'ébauche de l'affûtage de la plaquette en carbure se fait avec des meules en carbure de silicium.

B. BRISE-COPEAUX ET RAYON DE BEC.

Un copeau continu serait dangereux en raison des grandes vitesses de coupe que supportent les carbures métalliques. Il faut donc obligatoirement prévoir un brise-copeaux qui assure leur fragmentation.

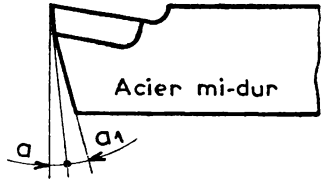


Fig:322- Dépouilles des outils à mise en carbure métallique.

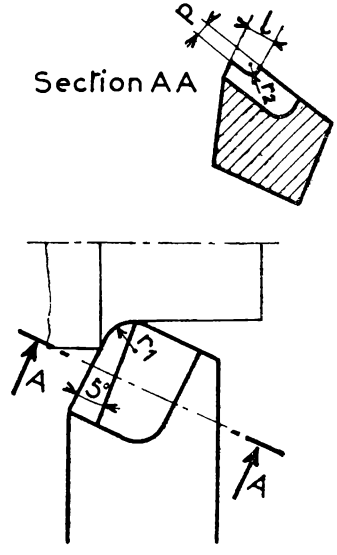


Fig:323- Dimensions du brise-copeaux.

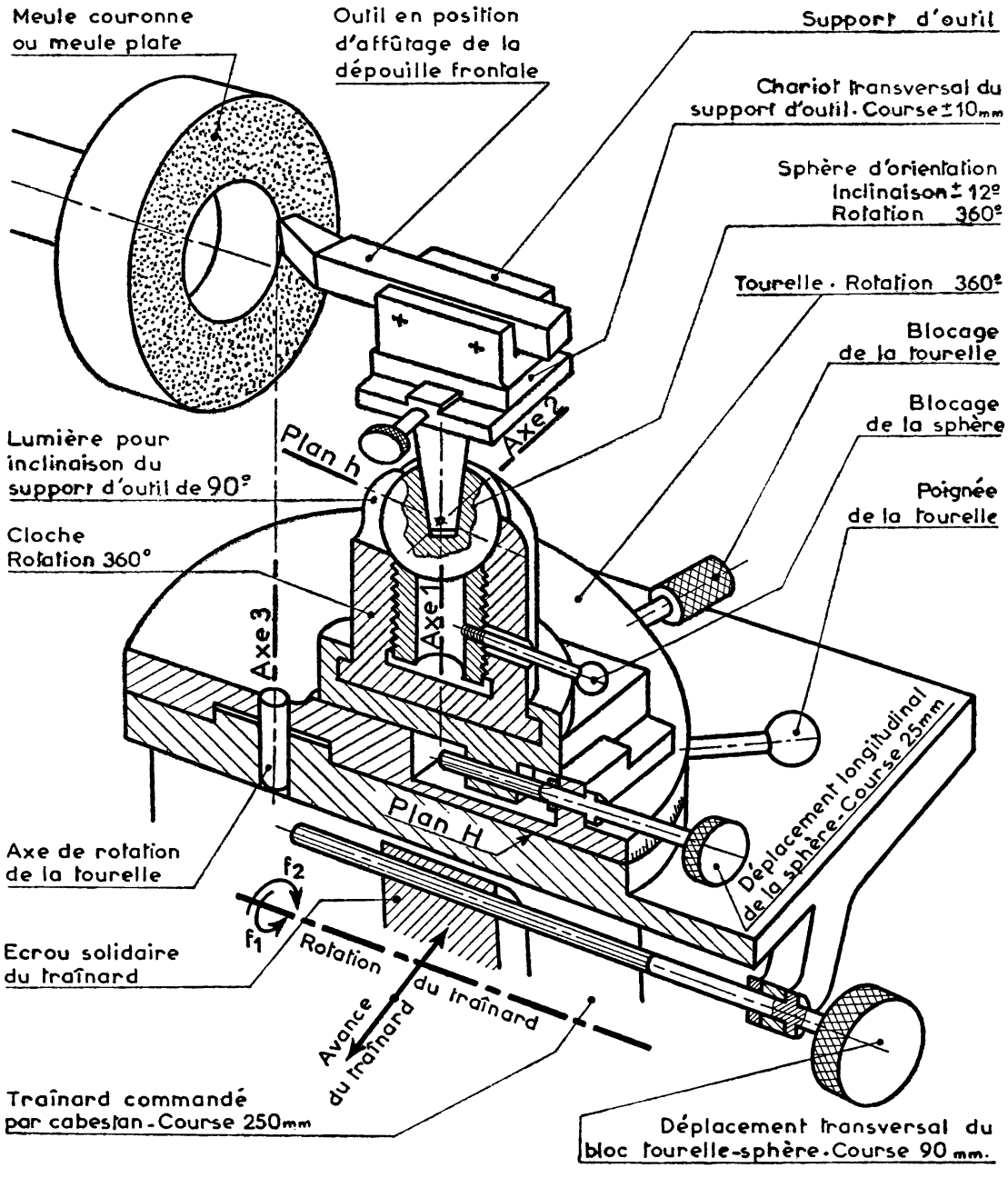

Meule couronne ou meule plate
Outil en position d'affûtage de la dépouille frontale
Support d'outil
Chariot transversal du support d'outil. Course ± 10mm
Sphère d'orientation Inclinaison ± 12° Rotation 360°
Tourelle. Rotation 360°
Blocage de la tourelle
Blocage de la sphère
Poignée de la tourelle
Lumière pour inclinaison du support d'outil de 90°
Cloche Rotation 360°
Plan h
Axe 2
Axe 1
Axe 3
Plan H
Déplacement longitudinal de la sphère. Course 25mm
Axe de rotation de la tourelle
f2
f1
Rotation
Avance du traînard
du traînard
Ecrou solidaire du traînard
Traînard commandé par cabestan. Course 250mm
Déplacement transversal du bloc tourelle-sphère. Course 90 mm.

Fig:319– Dispositif principal de l'orientation de l'outil de l'affûteuse "Constan"

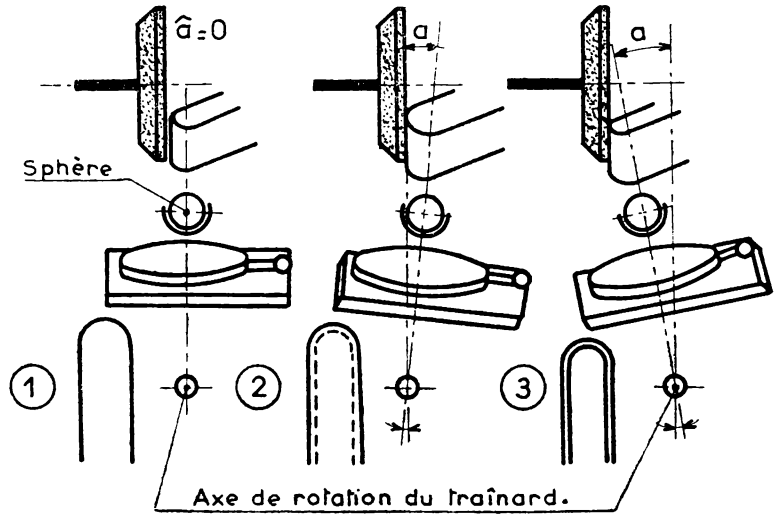


Fig:320- Orientation du support d'outil par inclinaison du traînard.

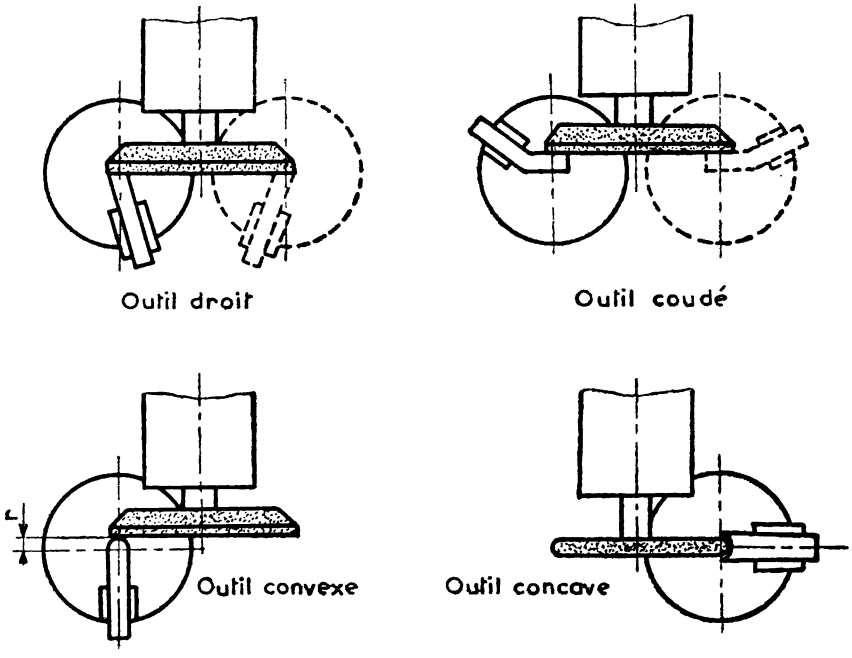


Fig:321- Différentes positions d'outils par rapport à la meule.

La forme et les dimensions du brise-copeaux (fig. 323) influent sur la fragmentation et sur la pression exercée par l'outil sur la pièce.

Les dimensions varient d'après :

— la section du copeau (ébauche ou finition);

— la ténacité du métal travaillé;

— la section du corps de l'outil.

Le tableau n° 5 indique ces dimensions pour une section de corps de 16 × 16 ou 12 × 25 et l'usinage de l'acier ainsi que la valeur du rayon d'arrondi du bec r_1 et du rayon du congé r_2.

Ténacité de l'acier usiné kg/mm²	Sexion maxi du copeau		Dimensions du brise-copeaux					
			Largeur	Profond	Rayon r_1		Rayon r_2	
	Prof. de passe	Avance par tour	l	p	Ebauche	Finition	Ebauche	Finition
50 à 75.....	3,5	0,4	1,8 à 2,4	0,4 à 0,5	0,5 à 0,7	0,3 à 0,4	0,6 à 0,7	0,4 à 0,5
75 à 110.....	3,5	0,4	1,5 à 2	0,3 à 0,4	0,5 à 0,7	0,3 à 0,4	0,4 à 0,6	0,3 à 0,4
110 à 140.....	3,5	0,4	1,2 à 6	0,2 à 0,3	0,5 à 0,7	0,3 à 0,4	0,3 à 0,5	0,2 à 0,3

Tableau n° 5. — Dimensions du brise-copeaux pour un outil en carbure métallique de corps de section 16 × 16 ou 12 × 25. Voir fig. 323.

C. ARRONDI DE L'ARETE COUPANTE.

L'arête coupante vive d'un outil carbure se crique presque toujours dès le début du travail, ce qui nuit à la durée de l'outil et peut parfois entraîner rapidement sa mise hors service. Le bris accidentel de l'arête coupante est dû le plus souvent à ce qu'elle est trop vive.

Des essais ont montré qu'une arête arrondie par rodage présente une durée de 40 % environ plus longue qu'une arête vive et ceci sans que la puissance de coupe soit sensiblement augmentée.

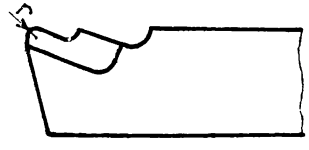


Fig. 324- Arrondi pré-construit de l'arête coupante.

Le rayon r (fig. 324) de l'arrondi du tranchant pré-rodé est de l'ordre de 0,05 à 0,1 *mm* pour les carbures tous usages et de 0,025 à 0,035 *mm* pour les carbures très durs de finition. Ce rayon peut être exécuté à la main par un praticien très expérimenté, à l'aide d'une pierre de grain 700 à liant bakélite. Mais il existe des machines qui permettent de l'obtenir avec précision par rodage mécanique.

AFFUTAGE DES FRAISES

La fraise étant un outil tournant, on conçoit aisément que toutes les arêtes tranchantes doivent être à égale distance de l'axe de rotation afin qu'elles coupent toutes également. C'est dire que

l'arbre porte-fraise et la broche de la machine à affûter doivent être sans jeu et parfaitement concentriques. Il faut de plus que chaque dent occupe la même position par rapport à la meule au cours de l'affûtage.

Le mode d'affûtage des fraises est fonction de la particularité de leur taille.

I. — FRAISES A DENTURE FRAISÉE

Nous étudierons l'affûtage d'une fraise à deux tailles à dents hélicoïdales. L'affûtage d'une fraise à taille droite, beaucoup plus simple, s'en déduira facilement.

A. AFFUTAGE PÉRIPHÉRIQUE.

1° Dispositif de mise en position de la fraise (fig. 352)

La fraise est montée en l'air ou entre pointes selon le cas. Un index de guidage et de division, réglable, sert d'appui à la fraise par sa face d'attaque. Au cours de l'avance **MA** donné à la fraise, celle-ci tourne et est appuyée sur l'index par un effort exercé dans le sens de la flèche **F**. Il en résulte que tous les points de l'arête coupante passent par le point **P** correspondant au contact meule-fraise. Ce point est à une hauteur constante **h** de l'axe de la fraise et détermine son nouveau rayon après affûtage.

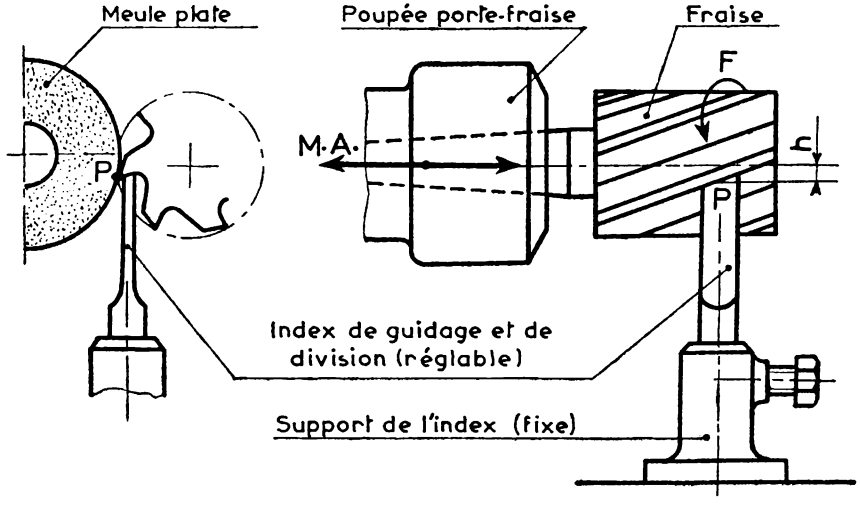


Fig:325 - Dispositif pour affûtage périphérique des fraises.

Pour que la fraise soit affûtée concentriquement, il faut que ce soit la dent affûtée qui s'appuie sur l'index. Si l'appui se faisait sur une autre dent, les erreurs de division provenant du taillage se répercuteraient lors de l'affûtage, ce qui amènerait à une fraise affûtée avec excentration.

2° Position relative fraise-meule.

L'affûtage périphérique doit donner la dépouille **a** (4° pour les fontes et aciers, 6 à 7° pour les métaux légers). Pour les fraises à taille hélicoïdale, il faut utiliser une meule plate travaillant par son champ légèrement bombé (fig. 326). Le point **P** de contact de la meule doit donc se trouver au-dessous de l'horizontale passant par l'axe de la meule de façon que le décalage des centres soit **h = Rayon meule** × sin **a.**

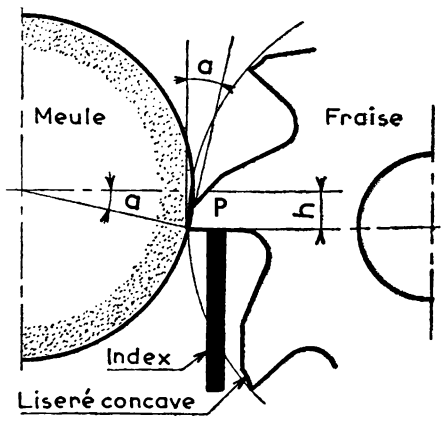


Fig:326- Affûtage par meule plate ordinaire. Le liseré est concave.

Lorsque le liseré devient trop large (fig. 327), il y a risque de talonnage de la fraise. Il faut alors réduire sa largeur par un deuxième affûtage pour le ramener de **L** à **l**. La largeur maximale acceptable est donnée par la relation $\mathbf{L} = \frac{\mathbf{D} \times \mathbf{d}}{\mathbf{D} + \mathbf{d}} \sin \mathbf{a}$.

En effet, dans le triangle OAO_1 (fig. 328), on a :

$\frac{AO}{\sin \widehat{O_1}} = \frac{OO_1}{\sin \widehat{A}}$ or $\widehat{A} = 180° - \widehat{a}$ et $\sin \widehat{A} = \sin (180° - a) = \sin \widehat{a}$; de plus OO_1 est sensiblement égal à $R + r$, puisque **a** est de l'ordre de 4°. On a donc : $\frac{AO}{\sin \widehat{O_1}} \simeq \frac{R+r}{\sin \widehat{a}}$

d'où : $\sin \widehat{O_1} \simeq \frac{R \sin \widehat{a}}{R + r}$.

Dans le triangle AMO_1, on a : $AM = O_1A \sin \widehat{O_1} = r \sin \widehat{O_1} \simeq \frac{Rr \sin \widehat{a}}{R + r}$

Par suite, la corde commune AA' a pour valeur : $AA' = 2AM \simeq \frac{2Rr \sin \widehat{a}}{R + r} \simeq \frac{D \times d}{D + d} \sin \widehat{a}$.

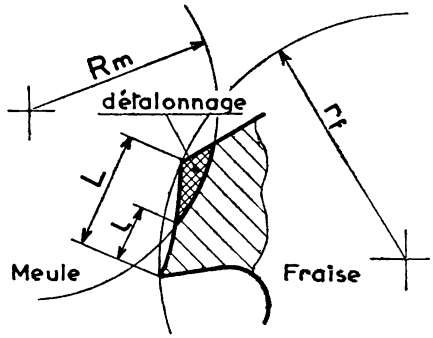


Fig:327- Défalonnage par deuxième affûtage.

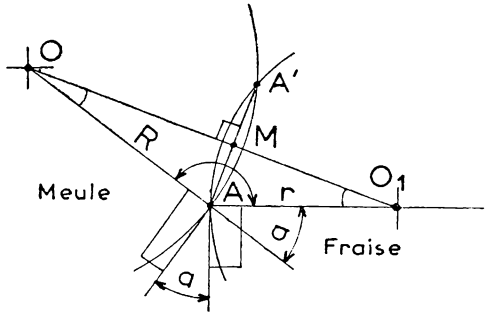


Fig:328- Lorsque le liseré atteint la valeur $AA' = \frac{D \times d}{D+d} \times \sin \widehat{a}$, la fraise talonne.

Remarque. L'affûtage périphérique des fraises à taille droite est réalisé à l'aide d'une meule boisseau (fig. 329). On obtient ainsi un liseré plan dont la dépouille est constante sur toute la longueur de l'arête coupante.

Le décalage de l'arête au-dessous du centre de la fraise doit être réglé à la hauteur $\mathbf{h} = \mathbf{R}$ fraise $\times$ sin $\mathbf{a}$.

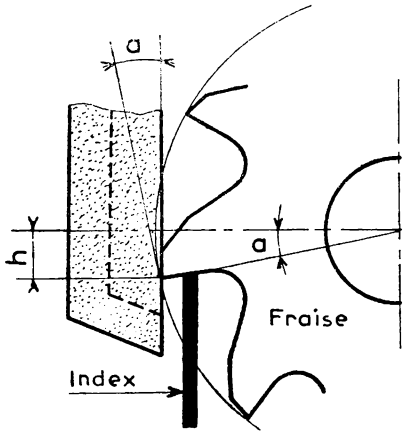


Fig:329- Affûtage par meule boisseau. Le liseré est plan.

B. AFFUTAGE EN BOUT.

Cet affûtage détermine la dépouille en bout $\mathbf{a}' = 4^0$ et la dépouille interne $\mathbf{a}'' = 0{,}5$ à 1^0 (fig. 330).

Le support de fraise doit donc être orientable autour de deux axes rectangulaires. L'index assure seulement la division d'une dent à l'autre. Le mouvement d'avance **MA** est orthogonal à l'axe de la fraise. La meule utilisée est une meule boisseau ou une meule assiette.

C. RETAILLAGE EN BOUT.

L'affûtage en bout diminue la hauteur du dégagement compris entre les dents de la fraise. Il faut donc, après un certain nombre d'affûtages, exécuter un retaillage à la meule. La figure 331 illustre cette opération.

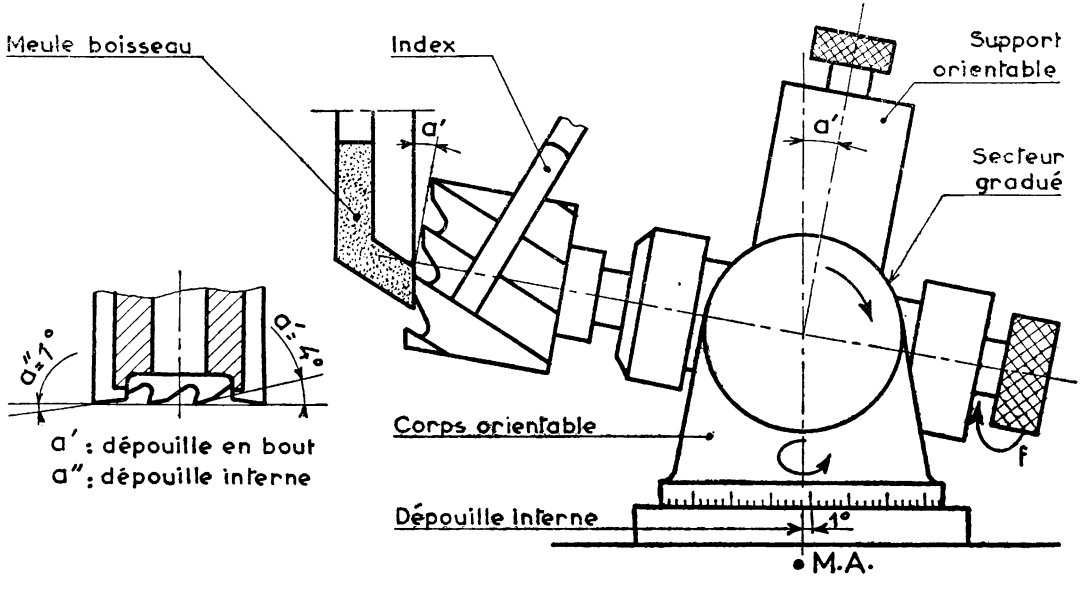


Fig:330- Affûtage en bout d'une fraise deux tailles.

II. — FRAISES A PROFIL CONSTANT

L'affûtage de ce type de fraise se fait obligatoirement sur la face d'attaque (fig. 332). La position de la fraise doit être telle que l'angle de pente d'affûtage **b** conserve sa valeur initiale et l'on doit toujours avoir :

$$\mathbf{r} = \textbf{Rayon fraise} \times \sin \mathbf{b}$$

Si la fraise n'a pas de pente d'affûtage, le plan de travail de la meule passe par l'axe de la fraise.

Un index diviseur sert d'appui à la fraise par le dos de la dent affûtée, le contact étant maintenu à la main par action suivant la flèche **f**.

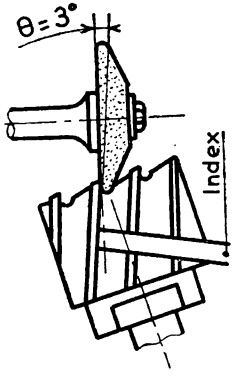


Fig:331- Retaillage en bout.

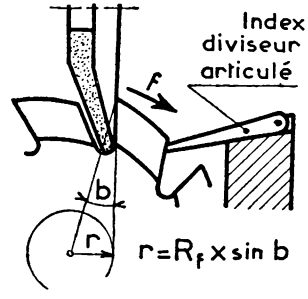


Fig:332- Affûtage d'une fraise à profil constant avec pente d'affûtage.

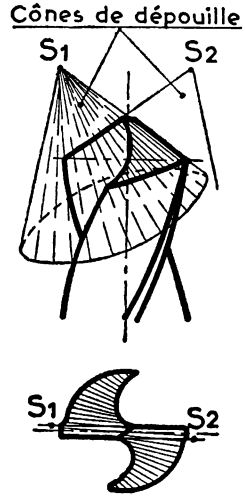


Fig:333-Dépouille et cônes de dépouille d'un foret.

AFFUTAGE DES FORETS

Les forets sont affûtés par meulage de la face en dépouille, surface latérale du cône de dépouille qui coiffe le foret et dont le sommet occupe respectivement pour chaque arête les points $\mathbf{s}_1$ et $\mathbf{s}_2$ (fig. 333). L'inclinaison de l'axe du cône donne à chaque face une dépouille de 5 à 6°.

L'affûtage du foret à la main est très difficile, car il faut :

— respecter la valeur de l'angle de pointe;

— donner à chaque arête la même longueur et la même inclinaison sur l'axe de l'outil;

— donner à chaque face une dépouille de même valeur.

L'affûtage à la machine peut seul assurer les impératifs ci-dessus. Un dispositif (fig. 334) permet la mise en position du foret qui lui donnera l'angle de pointe de valeur prévue.

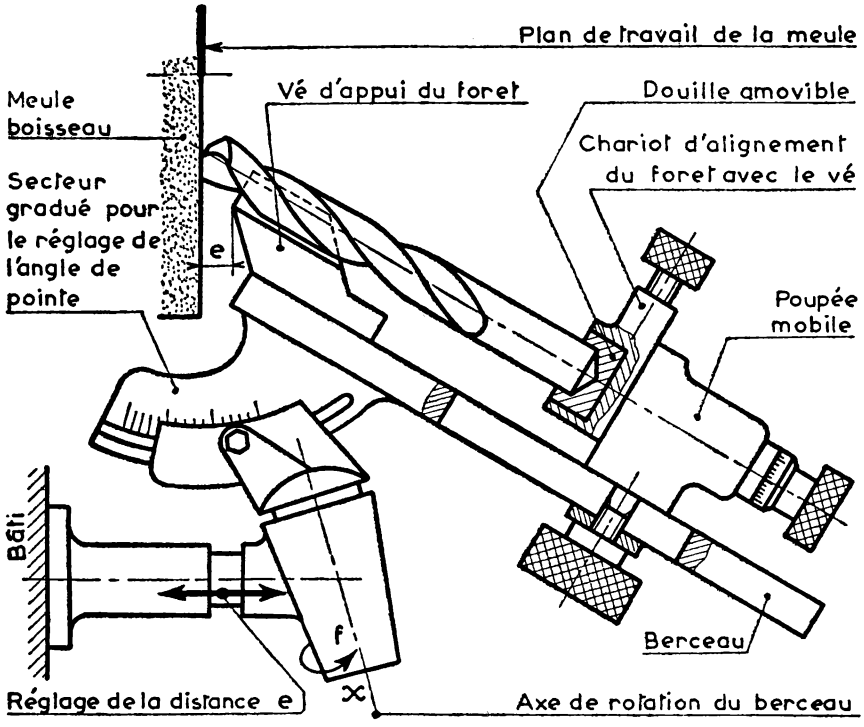


Fig:334 - Dispositif pour l'affûtage des forets et des forets-aléseurs.

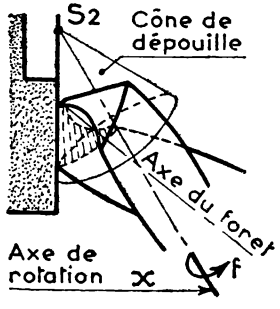


Fig:335- Le dispositif de la fig 334 assure la dépouille de la face en arrière du plan de figure.

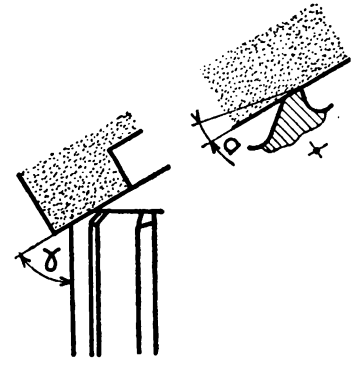


Fig:336- Affûtage en bout d'un alésoir.

Le berceau guide-foret tourne autour d'un axe **x** incliné par rapport au plan de travail de la meule. Cette rotation engendre le cône de dépouille de la face affûtée (fig. 335).

Chaque face en dépouille est meulée alternativement et un rochet diviseur est prévu pour effectuer la rotation par demi-tour pour les forets, par tiers ou par quart de

tour pour l'affûtage des forets-aléseurs selon qu'ils présentent trois ou quatre arêtes coupantes.

L'affûtage des forets se fait en deux temps : un affûtage d'ébauche qui élimine la partie toujours fortement émoussée de l'extrémité extérieure de l'arête coupante, et un affûtage de finition.

AFFUTAGE DES ALÉSOIRS

Les alésoirs, qu'ils soient à main ou à machine, ne s'affûtent que sur la face en dépouille de leur cône d'action (fig. 336).

L'obliquité γ de l'arête coupante de l'alésoir machine est fonction du travail à exécuter; on admet $\gamma = 60^0$ pour l'ébauche et 5^0 pour la finition. L'angle de dépouille **a** a une valeur de 2 à 5^0.

L'affûtage peut se faire à la meule boisseau ou à la meule plate par sa périphérie. L'affûtage est correct si toutes les dents travaillent simultanément et ne talonnent pas. La figure montre l'analogie qui existe entre l'affûtage de l'alésoir et du foret et celui de la fraise.

AFFUTAGE DES TARAUDS

Le travail de taraudage use principalement la partie taillante constituée par le cône d'entrée de l'outil et aussi, mais à un degré moindre, le profil du filet inscrit dans la face d'attaque.

L'affûtage sur la face d'attaque (fig. 337) doit conserver à l'outil la valeur de l'angle de pente d'affûtage **b**, afin que l'angle de pente effective de coupe θ soit adapté au métal à tarauder.

L'affûtage du cône d'entrée (fig. 338) doit donner à la face en dépouille convexe une dépouille de 6^0 environ. A cet effet, le support qui maintient l'outil entre pointes est orienté suivant l'angle de demi-conicité α et permet une rotation de l'outil autour du point **O'** tel que $\widehat{OAO'} = 6^0$, alors que l'axe du taraud passe par **O**.

La meule utilisée est une meule plate travaillant par sa périphérie.

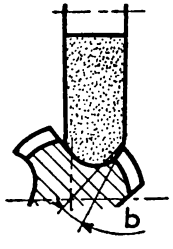


Fig:337-Affûtage sur la face d'attaque d'un taraud.

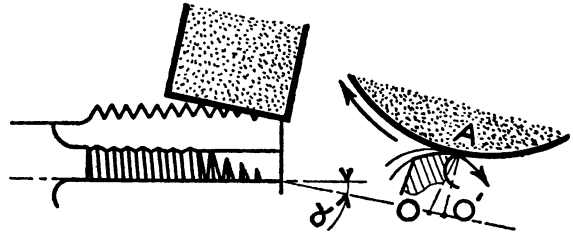


Fig:338-Affûtage du cône d'entrée d'un taraud.

LES TRAVAUX DE FILETAGE

Fileter, c'est usiner un sillon de section constante suivant un mouvement hélicoïdal. Le pas de l'hélice directrice est le pas du filetage. Un mouvement de rotation **MC** et un mouvement de translation **MA** dont le rapport des vitesses est constant engendrent le mouvement hélicoïdal.

La précision recherchée dans le filetage dépend de la fonction de l'organe fileté (1). Cette précision et le prix de fabrication commandent le procédé de filetage à choisir parmi les suivants :

— filetage à l'outil de coupe,

— filetage à la meule,

— filetage par déformation.

FILETAGE A L'OUTIL DE COUPE

I. — FILETAGE A L'OUTIL A TAILLANT UNIQUE

A. ÉTABLISSEMENT DE L'OUTIL.

L'étude qui suit, relative à l'outil à profil triangulaire, pourra servir de base à l'étude de tous autres profils.

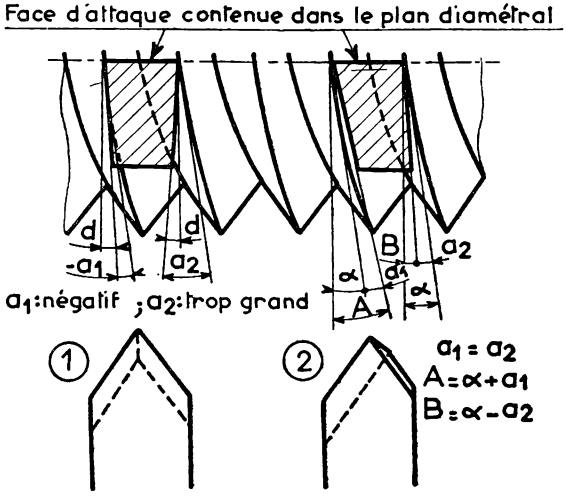


Fig. 339 - Dépouille d'un outil à fileter.
(1) Mauvaise dépouille : l'outil talonne sur le flanc gauche.
(2) Bonne dépouille : les deux angles α ont la même valeur convenable.

1° Profil de l'outil.

Lorsque l'outil n'a pas de pente effective de coupe, son profil est celui du sillon à tailler.

Si l'outil a une pente effective de coupe, son profil doit être modifié (2).

2° Dépouille de l'outil.

Pour que l'outil ne talonne pas sur un flanc du filet et qu'il n'ait pas une dépouille exagérée sur l'autre flanc, il faut la mesurer par rapport à la tangente à l'hélice moyenne.

La figure 339-1 montre un outil mal affûté. La dépouille **d** construite symétriquement par rapport au plan de base de l'outil conduit aux dépouilles réelles a_1 qui est négative et a_2 qui est trop grande.

(1) Voir « Métrologie du filetage », première partie, classe de Première.

(2) Voir « Étude des outils de coupe », classe de Deuxième.

La figure 339-2 est l'illustration d'un outil bien dépouillé. Pour une dépouille $\mathbf{a} = 4$ à 6° et une tangente à l'hélice moyenne inclinée de α, on a, par rapport au plan de base :

$$\widehat{\mathbf{A}} = \widehat{\alpha} + \widehat{\mathbf{a}_1} \quad \text{et} \quad \widehat{\mathbf{B}} = \widehat{\alpha} - \widehat{\mathbf{a}_2} \quad \text{avec} \quad \widehat{\mathbf{a}_1} = \widehat{\mathbf{a}_2} = 4 \text{ à } 6°$$

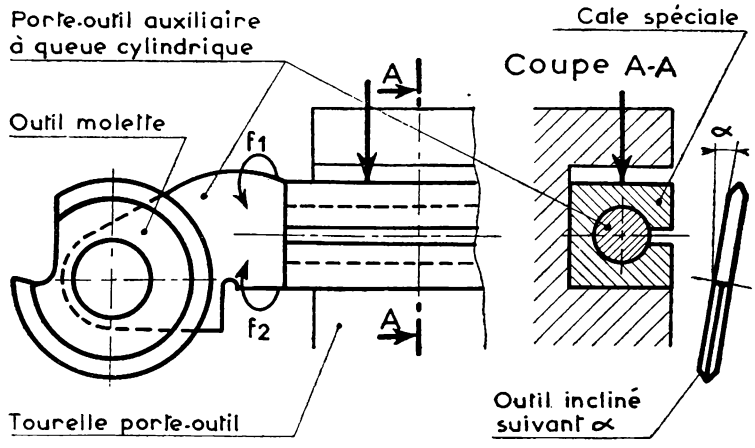


Fig:340 - Porte-outil à fileter orientable.

Certains outils, l'outil molette par exemple, qui est à profil constant, sont montés sur un porte-outil auxiliaire qui permet leur orientation et, par suite, le respect de ces angles (fig. 340).

B. FILETAGE AU TOUR PARALLÈLE.

Il est le plus souvent adopté pour des pièces d'outillage, car le travail est long et coûteux du fait :

— du nombre élevé de passes qu'il faut exécuter;

— de la vitesse de coupe réduite imposée par les précautions que l'opérateur doit prendre pour éviter la détérioration de l'outil et de la pièce, surtout si le filetage est immédiatement suivi d'un épaulement.

C. FILETAGE SUR MACHINE SPÉCIALE.

La machine Cri-Dan est un type très utilisé de machine à fileter à outil d'un seul taillant. Elle reproduit automatiquement, à l'aide d'un système de cames et de leviers, les mouvements que l'outil accomplit au cours du filetage au tour parallèle. Lorsque le filetage est terminé, les mouvements de la broche et des chariots s'arrêtent et l'outil se trouve à sa position de départ pour un nouveau filetage.

Le cycle de filetage est schématisé sur la figure 341. Aux enfoncements de l'outil $\mathbf{e}_1$, $\mathbf{e}_2$, $\mathbf{e}_3$,

e_4, e_5, e_6, qui sont dégressifs tout en maintenant une section de copeau constante, correspondent les reculs r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6. Le filetage est ainsi réalisé en cinq passes effectives.

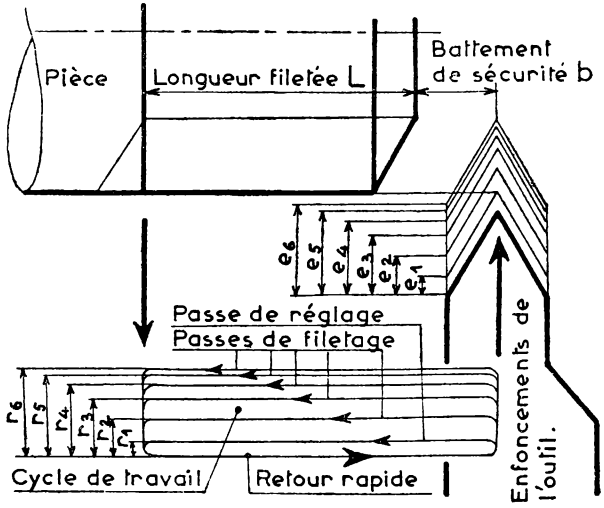


Fig.341- Principe du filetage sur machine CRI-DAN.

L'outil en carbure métallique est pratiquement le seul utilisé et travaille à une vitesse de coupe qui est celle d'un chariotage de finition. Sa pénétration est normale, c'est-à-dire qu'il coupe sur ses deux flancs.

Du fait de la vitesse élevée de travail, les chariots mobiles sont en alliage léger traité et montés sur roulements à aiguilles. Ainsi, l'inertie des masses en mouvement est considérablement réduite. Comme d'autre part il y a rappel des chariots par des ressorts assurant leur appui constant contre les cames, on obtient une marche sans chocs avec une grande précision des déplacements répétés des chariots.

Les filetages intérieurs sont aussi bien réalisables que les filetages extérieurs.

Came des pas.

La came des pas (fig. 342), que nous étudierons à l'exclusion des autres, est la came-mère de la machine. C'est une came tambour. Elle commande le chariot longitudinal pour son déplacement parallèle à l'axe du filetage et remplace donc la vis-mère du tour parallèle.

Le rapport :

$$\mathbf{R} = \frac{\text{Rotation broche en tr/mn}}{\text{Rotation came en tr/mn}} = \frac{\text{Pas de la came } \mathbf{P}}{\text{Pas à fileter } \mathbf{p}}$$

doit être entier afin que l'outil et la pièce se présentent toujours dans la même position au début de chaque passe. Ce rapport peut être modifié par des pignons interchangeables.

La rampe de travail **A** correspond à la course de l'outil comprenant la longueur à

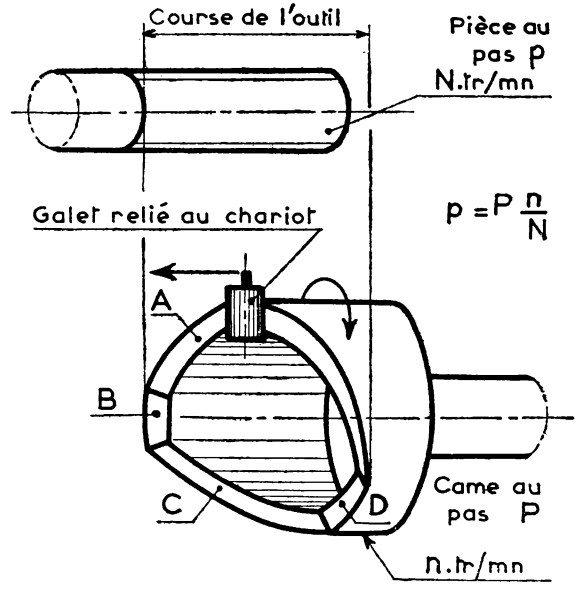


Fig:342- Schéma de la came-mère commandant le chariot porte-outil.

fileter **L** et le battement **b** dit de sécurité. Cette rampe s'étend sur 240°, c'est-à-dire sur les 2/3 du cycle de travail (fig. 343).

Exemple de calculs. Pour une longueur filetée de 35 *mm* au pas 1,5 *mm* à un filet et un battement de sécurité de 2 *mm* au minimum, on a :

$$\mathbf{P} = \frac{360°}{240°}\ (\mathbf{L} + \mathbf{b}) = \frac{3}{2} \times (35 + 2) = 55{,}5\ mm$$

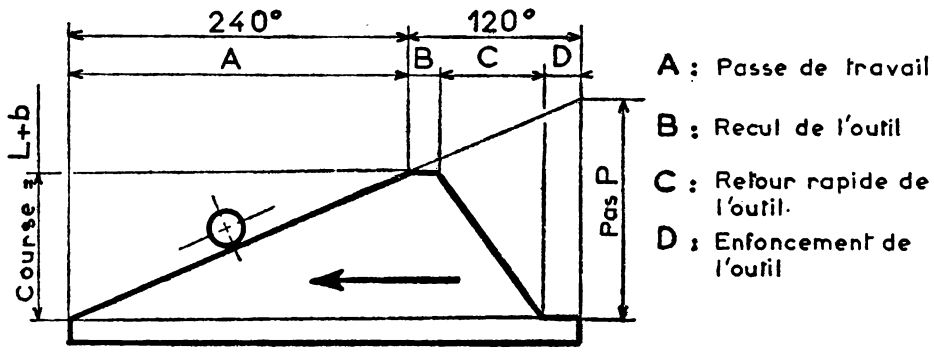


Fig:343- Came des pas développée.

Mais **P** doit être multiple du pas 1,5. Nous prendrons 60 car cette came existe dans la série standard livrée avec la machine.

D'où :
$$\mathbf{R} = \frac{60\ \text{(pas de la came)}}{1{,}5\ \text{(pas à fileter)}} = 40$$

Pour obtenir ce rapport, la machine ayant déjà une réduction fixe égale à 12 donnée par boîtes de vitesses, on calcule les roues à monter sur la lyre en posant :

$$\frac{\text{Rotation pièce}}{\text{Rotation came}} = 40 = \frac{12}{1} \times \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{y}} \text{ d'où } \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{y}} = \frac{40}{12} = \frac{80 \times 50\ \text{(roues menées)}}{40 \times 30\ \text{(roues menantes)}}$$

Came des avances.

Cette came commande le nombre de passes. Elle est choisie dans un tableau dressé d'après les conditions de travail.

II. — FILETAGE A LA FRAISE

Le filetage à la fraise conduit à une répartition du travail sur un grand nombre d'arêtes coupantes, ce qui réduit l'usure de l'outil. D'autre part, l'opération de filetage étant réalisée en deux passes au maximum, l'usure des organes de la machine est nettement diminuée.

A. FILETAGE A LA FRAISE UNIQUE (fig. 344).

La pièce, généralement longue et à pas important (vis de commande de chariots par exemple), tourne lentement : 2 *tr/mn* au maximum. C'est la fraise qui a le mouvement de coupe.

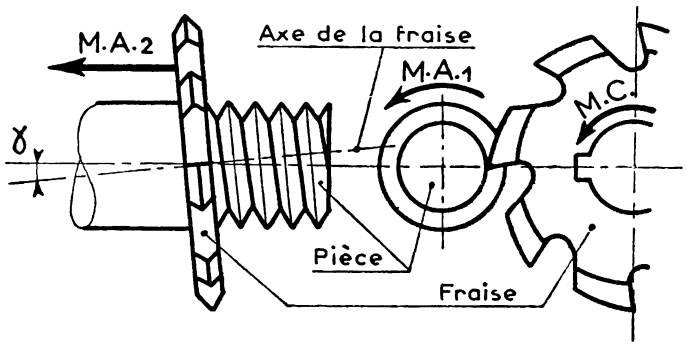


Fig:344- Filetage à la fraise unique.

L'axe de la fraise est incliné sur l'axe du filetage suivant l'angle d'inclinaison α de la tangente à l'hélice moyenne. Pour chaque tour de pièce, la fraise se déplace d'une longueur égale au pas à construire.

Selon la grandeur du pas, le filetage est exécuté en une ou deux passes. La pièce est soutenue par une lunette à suivre spéciale. La fraise est à profil constant ou à denture fraisée.

B. FILETAGE A LA FRAISE MULTIPLE (fig. 345).

La fraise est constituée par une série de sillons circulaires identiques au sillon du filet et écartés d'un pas. Des rainures transversales, droites ou hélicoïdales, forment les dents et assurent le logement du copeau.

Comme précédemment, c'est la fraise qui reçoit le mouvement de coupe et la pièce, qui tourne lentement et se déplace axialement, reçoit le mouvement d'avance. L'outil est incliné sur l'axe du filetage d'un angle α égal à l'inclinaison de la tangente à l'hélice moyenne.

Ce procédé est appliqué pour les filetages courts à pas fin.

Exemple : Filetage d'un moyeu de roue de bicyclette recevant la roue libre.

Pour un diamètre de 40 *mm* au pas 1 *mm*, la tangente est de 0,008 soit un angle d'inclinaison $\alpha = 28'$, négligeable quant à la variation qu'il provoque dans le profil du filet et dans son diamètre.

Le processus du filetage est le suivant : la fraise tournant et la pièce étant à l'arrêt, on enfonce d'abord la fraise à fond de filet. Après un tour de pièce, le filetage est théoriquement terminé mais, pratiquement, on fait 1/6 de tour en plus pour obtenir des filets bien raccordés.

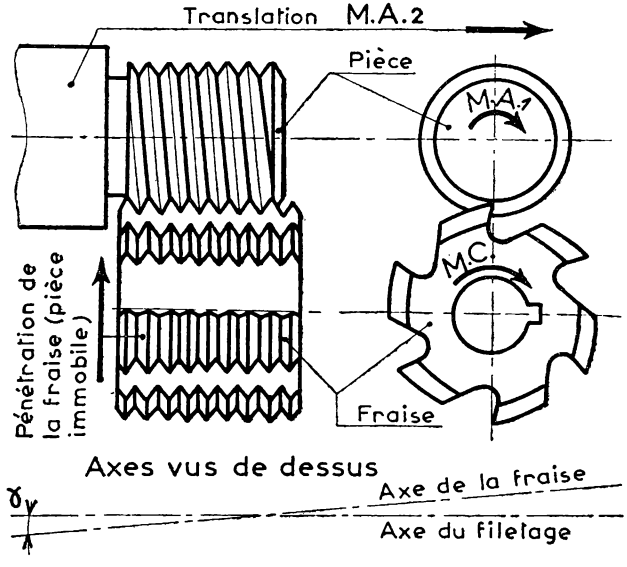


Fig:345- Filetage à la fraise multiple.

C. MACHINES A FILETER A LA FRAISE.

La machine à fraise unique a l'allure générale d'un tour parallèle à fileter. Le chariot porte-outil est entraîné par vis-mère et la liaison broche-vis-mère s'établit par des calculs identiques à ceux du filetage au tour. Fraise et broche sont entraînés par moteurs individuels.

La machine à fraise multiple présente les particularités suivantes (fig. 346) :

— la broche, en plus de son mouvement de rotation, se déplace axialement car la fraise est immobile en translation;

— la reproduction du pas par déplacement axial de la broche est produite par un système vis-patronne et écrou au pas du filet à construire. La patronne est solidaire de la broche, tandis que l'écrou est solidaire du bâti et, par suite, fixe;

— la broche et la fraise ont chacune leur moteur individuel.

Production. Pour un travail identiquement reproduit, lorsque le filetage est court, le procédé à la fraise multiple est nettement supérieur à celui à la fraise unique. L'ordre de grandeur de cette supériorité est de 5 environ.

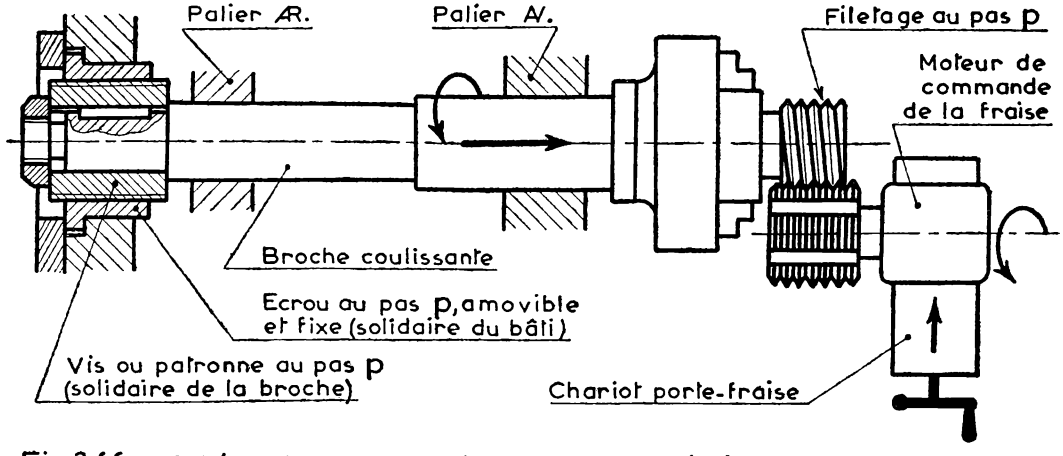

Palier AR.
Palier AV.
Filetage au pas p
Moteur de commande de la fraise
Broche coulissante
Ecrou au pas p, amovible et fixe (solidaire du bâti)
Vis ou patronne au pas p (solidaire de la broche)
Chariot porte-fraise

Fig:346 – Schéma des mouvements des organes principaux d'une machine à fraise multiple "Rouchaud".

III. — FILETAGE A LA FILIÈRE

Le filetage mécanique à la filière est réalisé au tour à décolleter ou sur machines spéciales. Les filières sont à **peignes mobiles,** sauf pour les petits diamètres où la filière est d'un seul bloc.

Les peignes, au nombre de quatre, travaillent tangentiellement ou radialement. Dans les deux cas, leur déclenchement, c'est-à-dire l'écartement des peignes en fin de filetage, est automatique.

A. FILIÈRES A PEIGNES TANGENTIELS (fig. 347).

Les peignes sont logés dans une cage non représentée sur la figure et dans laquelle sont incorporés les systèmes de déclenchement et d'armement de la filière.

Leur taille, rectiligne et inclinée suivant la tangente à l'hélice moyenne, est finie par rectification et leur affûtage se fait en bout. Chaque peigne est donc un outil à profil constant. Afin de faciliter la prise de la filière, les peignes ont une entrée qui constitue le cône d'action de la filière, la partie cylindrique calibrant le filetage.

Au cours du réglage, ne pas pousser les peignes trop en avant, afin d'éviter leur frottement trop important sur les filets construits.

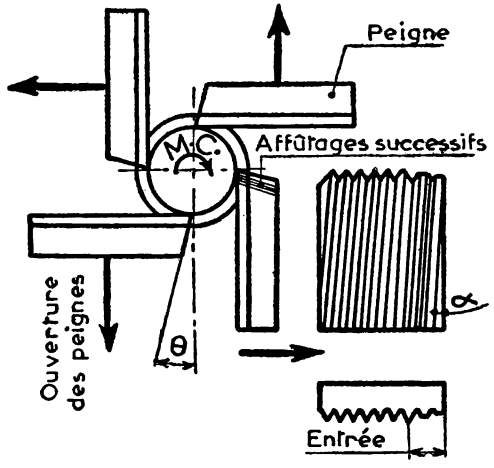


Fig:347- Mode d'action des peignes tangentiels

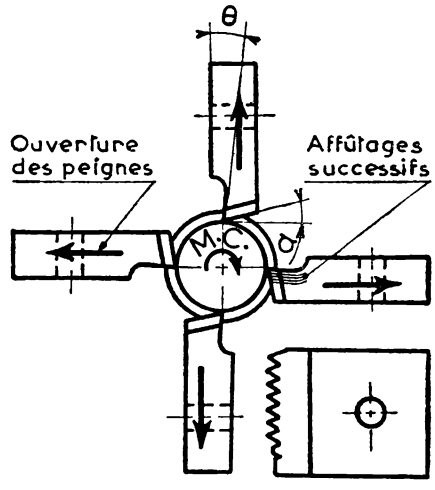


Fig:348- Mode d'action des peignes radiaux.

B. FILIÈRES A PEIGNES RADIAUX (fig. 348).

Ce sont aussi des outils à profil constant taillés en bout. L'angle de pente effective de coupe est réduit afin de ne pas trop diminuer la résistance de l'outil. Le nombre d'affûtages possibles est limité par l'affaiblissement de l'outil et très réduit, alors que sur les peignes tangentiels, ce nombre d'affûtages possibles est très élevé.

Remarques. 1° Quel que soit le genre de peignes, si l'on veut un filetage se terminant contre un épaulement il faut, après filetage avec peignes à entrée normale, terminer avec des peignes sans entrée, un simple chanfrein en tenant lieu.

2° Deux peignes qui se suivent présentent des filets décalés du quart du pas. Il importe donc, après affûtage, de remonter chaque peigne dans son logement correspondant repéré.

C. MACHINES A FILIÈRE A PEIGNES.

La figure 349 est le schéma de principe de la machine Landis avec vis-mère. Il y a donc liaison de la broche à la vis-mère et la raison de l'équipage se calcule comme pour le filetage au tour parallèle à fileter.

La filière possède le mouvement de coupe, la pièce est seulement mobile en translation. Des taquets réglables, solidaires du chariot porte-pièce, font jouer les leviers de déclenchement et d'armement automatiques de la filière.

L'étau porte-pièce à mâchoires en vé assure un serrage efficace et un alignement pièce-outil rapide et précis.

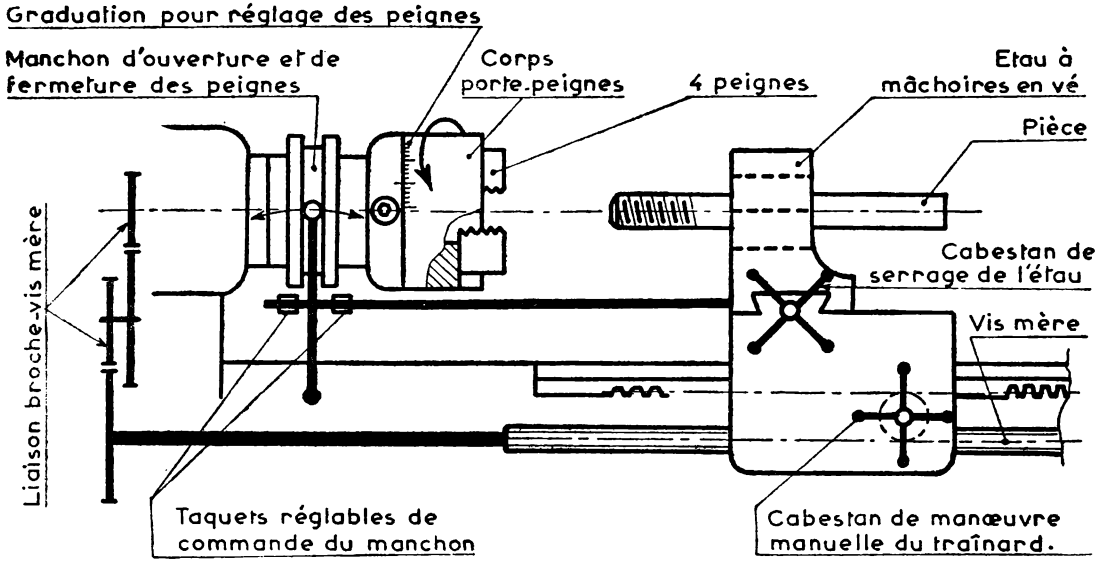

Graduation pour réglage des peignes
Manchon d'ouverture et de fermeture des peignes
Corps porte-peignes
4 peignes
Etau à mâchoires en vé
Pièce
Cabestan de serrage de l'étau
Vis mère
Liaison broche-vis mère
Taquets réglables de commande du manchon
Cabestan de manœuvre manuelle du traînard.

Fig:349- Schéma d'une machine à fileter à vis mère "Landis"

FILETAGE PAR MEULAGE

Le filetage à la meule, réservé à l'origine à la rectification des filetages de haute qualité, est devenu un procédé courant de taillage des filetages directement dans la masse.

Il présente une grande analogie avec le filetage à la fraise et on utilise un outil-meule à profil unique ou à profil multiple.

I. — FILETAGE A LA MEULE A PROFIL UNIQUE (fig. 350).

La meule est taillée au profil du filet. Elle est inclinée sur l'axe de la pièce suivant la tangente à l'hélice moyenne et se déplace du pas à chaque tour de pièce. Plusieurs passes sont toujours nécessaires.

On applique ce procédé pour la rectification des vis-fraises, des tampons filetés par exemple. La précision est de 1 à 2 μ en diamètre et de 3 μ pour les erreurs de pas sur 25 *mm* de longueur.

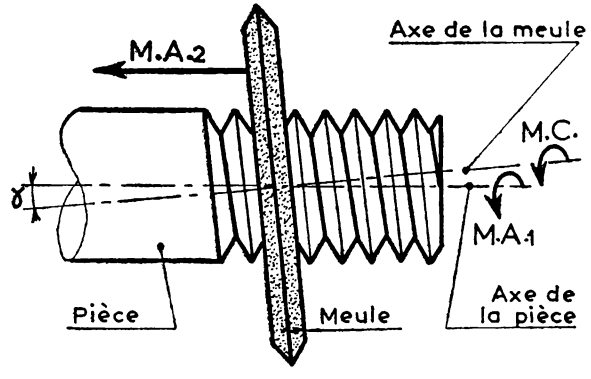


Fig: 350- Filetage à la meule à profil unique.

La meule est profilée au diamant (fig. 351) d'après un guidage de forme. Les mouvements de profilage se font suivant 1, 2 et 3 pour ne pas écailler les angles de la troncature du sommet.

II. — FILETAGE A LA MEULE MULTIPLE

A. FILETAGES COURTS (fig. 352).

La meule porte une série de stries circulaires au profil demandé et travaille en plongée. Son inclinaison sur l'axe de la pièce est celle de la tangente à l'hélice.

La longueur à fileter étant inférieure à la largeur de la meule, il suffit d'un peu plus d'un tour de pièce pour réaliser l'opération. On peut aussi effectuer une ou plusieurs passes d'ébauche et une passe de finition, surtout lorsque le filetage est taillé dans la masse. L'avance axiale de la pièce est produite par vis-patronne.

La meule est profilée à la molette ou au diamant.

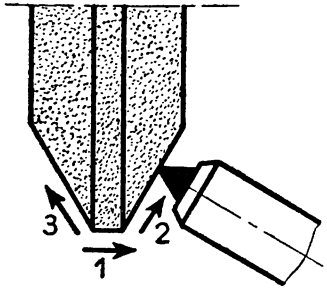


Fig:351- Profilage d'une meule simple au diamant.

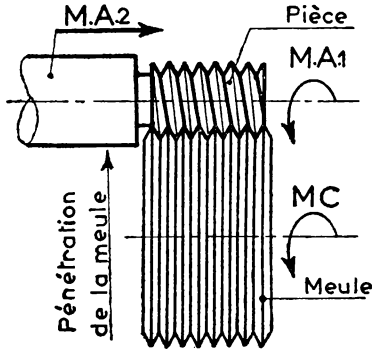


Fig:352- Filetage à la meule à profil multiple.

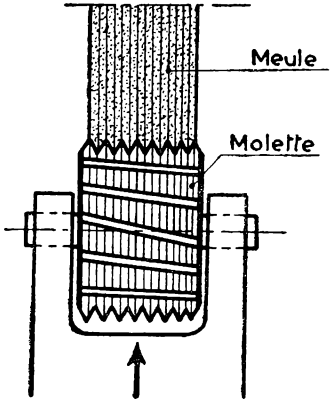


Fig:353- Affûtage de la meule à la molette.

1° A la molette (fig. 353).

Une molette en acier rapide de dureté 65 Rockwell C et pourvue de stries circulaires au profil à obtenir est pressée contre la meule. La molette est pourvue de goujures hélicoïdales qui favorisent la désagrégation de la meule. La vitesse de rotation de la molette, 150 *tr/mn*, est obtenue par adhérence contre la meule. Les stries s'impriment dans un temps de 3 *mn* environ.

2° Au diamant (fig. 354).

La meule, en position de travail, c'est-à-dire inclinée suivant la tangente à l'hélice, est taillée par un diamant qui reçoit :

— un mouvement radial $\mathbf{f}_1$ ou $\mathbf{f}_2$ commandé par came;

— un mouvement d'avance **f** par vis-mère.

La combinaison des mouvements **f** et $\mathbf{f}_1$ ou **f** et $\mathbf{f}_2$ engendre le profil de la meule.

B. FILETAGES LONGS (fig. 355).

Pour les filetages longs, pris dans la masse, afin de réduire le nombre de passes, on utilise une meule à entrée.

Le déplacement axial de la meule est commandé par écrou et vis-mère doublée parfois d'un correcteur des variations de pas.

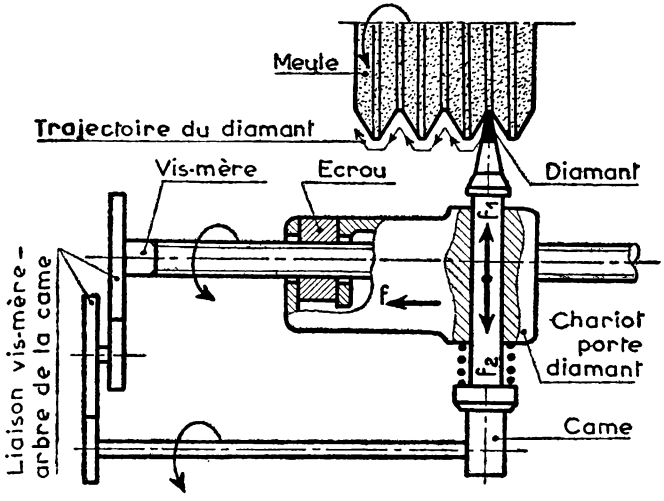


Fig:354- Schéma de principe d'une machine à came pour l'affûtage des meules à profil multiple.

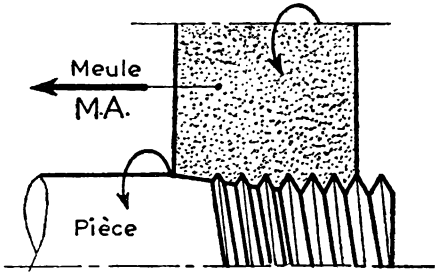


Fig:355- Filetage long avec meule à entrée.

FILETAGE PAR DÉFORMATION DU MÉTAL

I. — GÉNÉRALITÉS

Par ce procédé, il n'y a pas coupe mais déplacement du métal par laminage au cours de son roulement entre deux molettes ou entre deux peignes (fig. 356).

Comme il y a déplacement de la matière depuis les creux du filet vers les sommets, il faut que le diamètre de la tige à fileter soit plus petit que le diamètre nominal de la vis.

La figure 357 est la macrographie d'un filet roulé montrant le déplacement

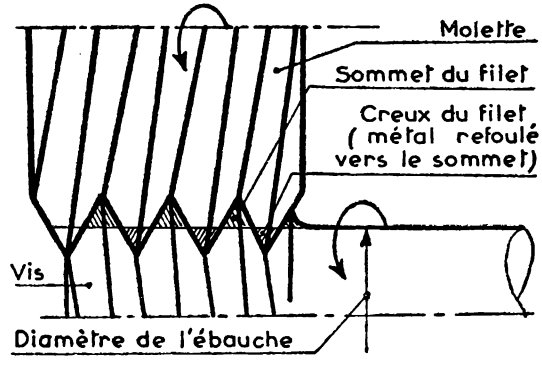


Fig:356- Laminage du métal dans le filetage par roulage.

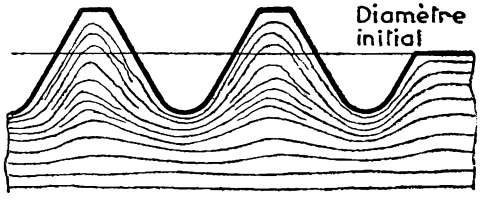


Fig:357- Micrographie d'un filet roulé.

des fibres. Les vis roulées résistent mieux à l'extension et au cisaillement que les vis taillées, car les fibres ne sont pas coupées. De plus, les flancs du filet résistent mieux à l'usure parce que le métal est fortement écroui dans la zone déformée.

Pour que ce procédé soit applicable, il faut que le métal ait un allongement minimum $\mathbf{A} \geqslant 5\%$ et une charge de rupture maximum $(\mathbf{Rr})e \leqslant 110\ kg/mm^2$.

Le filetage par roulage peut se faire **en plongée** ou **à l'enfilade.**

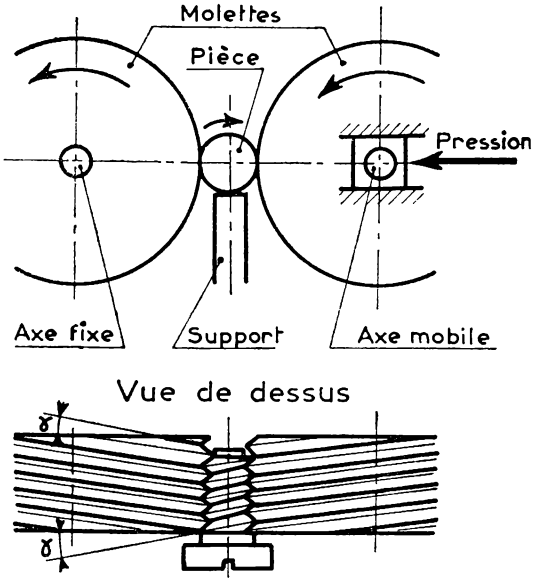


Fig: 358- Filetage par roulage en plongée avec molettes.

II. — FILETAGE EN PLONGÉE

A. ACTION DES MOLETTES (fig. 358).

La pièce, supportée par une réglette réglable, est placée entre deux molettes cylindriques de façon que son axe soit légèrement au-dessous de la ligne des centres (environ 0,3 *mm*). Une des molettes, dont l'axe est mobile, se rapproche progressivement de l'autre sous l'effet d'une presse hydraulique.

Les molettes, qui sont identiques, tournent dans le même sens et à la même vitesse. Ce sont des vis en acier rapide d'un diamètre voisin de 150 *mm*. Leur diamètre moyen Δ est un multiple entier **M** du diamètre moyen de la vis et leur pas est le produit du pas de la vis par ce même multiplicateur **M**. L'inclinaison de leurs filets est la même que celle des filets de la vis, mais inversée. Il faut donc un jeu de molettes pour chaque modèle de vis (pas, diamètre et profil). La longueur des molettes s'étale de 30 à 120 *mm*.

Exemple : Pour une vis à droite à 1 filet de 16 pas 2, profil ISO, longueur de filetage 70 *mm*, les molettes ont les caractéristiques dimensionnelles suivantes pour M = 10 :

Diamètre moyen : 14,3 × 10 = 147 *mm* - Pas à gauche : **P** = 2 × 10 = 20 *mm* - Nombre de filets dans le pas : 10 - Longueur : 40 *mm*.

Au cours du filetage, il y a roulement de la vis sans translation (fig. 359).

En effet, la vitesse linéaire d'un point **m** pris sur la circonférence moyenne de la vis et des molettes est la même. Pour chaque tour de la vis, si **M** = 6 par exemple, les molettes font un sixième de tour et le point **m** vient en $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2 \ldots \mathbf{m}_6(\mathbf{m}_6)$. Il n'y a donc pas translation de la pièce filetée.

B. MACHINE POUR FILETAGE EN PLONGÉE.

La figure 360 est le schéma de principe de la machine Pee-Wee, une des plus répandues.

L'écartement et le rapprochement des molettes sont automatiques. Lorsque l'électro-vanne est fermée, l'huile issue de la pompe suit le circuit **f** et provoque le rapprochement de la molette dont l'axe est mobile. Dès que l'enfoncement est terminé, un des taquets réglables commande le relais électrique d'ouverture de l'électro-vanne (cas de la figure), un ressort de rappel ramène

le chariot porte-molette. L'huile refoulée emprunte le circuit f_1 et l'huile débitée par la pompe revient au réservoir par le même circuit. Lorsque le retour du chariot est terminé, le deuxième taquet réglable commande le relais de fermeture de l'électro-vanne et le circuit recommence suivant **f**.

La poussée hydraulique, qui peut atteindre 15 tonnes, est contrôlée par un manomètre. Elle est variable suivant la rapidité de travail désirée et la matière.

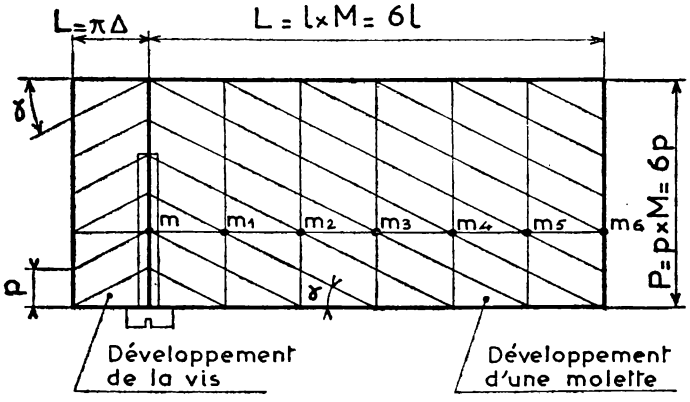


Fig:359- Sous l'action des molettes au cours du filetage en plongée, la vis roule sans translation.

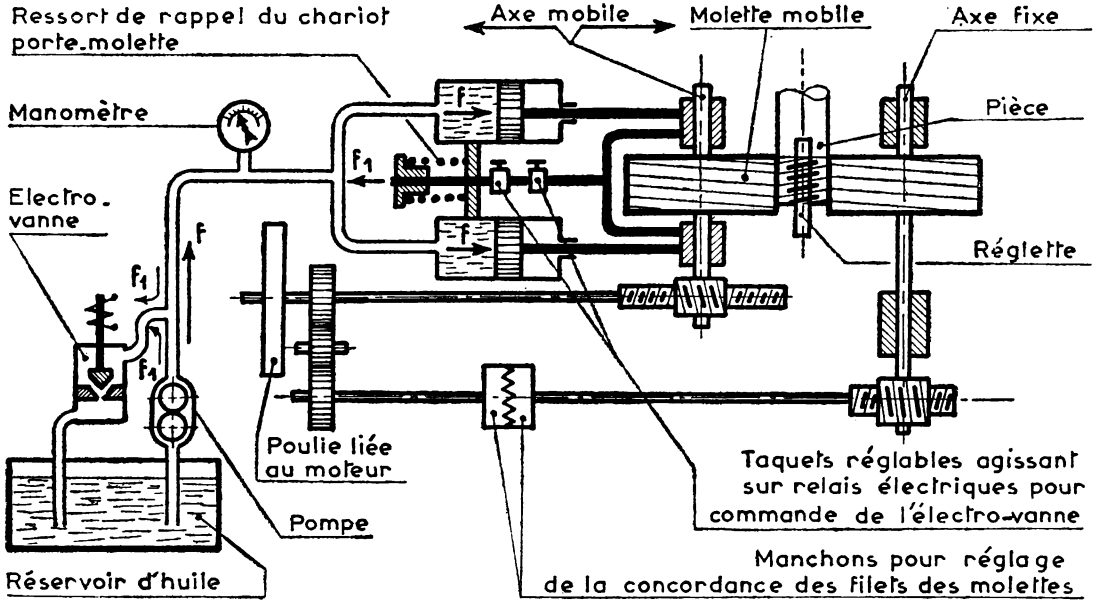


Fig:360- Schéma de principe de la machine à fileter à la molette PEE-WEE

III. — FILETAGE A L'ENFILADE (fig. 361).

Pour les filetages de grande longueur (tige filetée de 1 *m* par exemple), le travail est réalisé à l'enfilade.

Les molettes sont réglées à l'écartement voulu. Elles présentent une entrée conique qui lamine le métal et leur partie arrière cylindrique calibre le filetage.

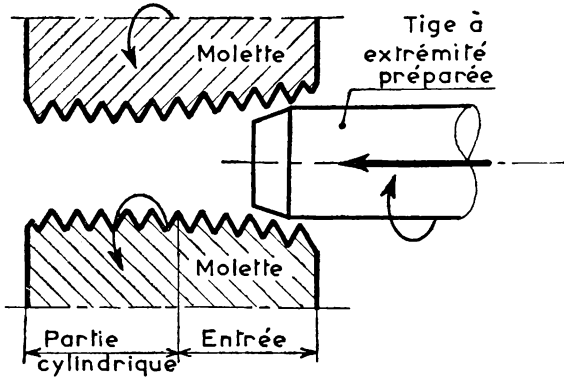


Fig:361- Molettes pour filetage roulé à l'enfilade.

Le déplacement axial de la vis provient de la construction des molettes. Leurs filets ont une inclinaison $\alpha' = \frac{2}{3}$ de l'inclinaison des filets de la vis. Il s'ensuit que **les flancs de la vis glissent sur les flancs des filets des molettes** au lieu de rouler seulement.

Reprenons l'exemple précédent, vis de 16 pas 2 avec M = 10. On a encore :

Diamètre moyen des molettes :
14,7 × 10 = 147 - Pas des molettes :*mm*
$\mathbf{P} = (2 \times 10) \times \frac{2}{3} = 13{,}3$; nous prendrons 14 parce que ce nombre est multiple de 2 - Nombre de filets : 7.

Pour un tour des molettes, la vis avance de :
2 × 10 — 2 × 7 = 20 — 14 = 6 *mm*.

IV. — FILETAGE PAR PEIGNES

Les peignes peuvent être considérés comme des molettes de rayon infini. Ce sont donc des prismes à taille rectiligne suivant la tangente à l'hélice moyenne de la vis, mais inversée (fig. 362).

Les peignes présentent une entrée à chaque extrémité. Lorsque l'entrée, qui fatigue plus que la partie calibrante, est usée, on retourne les peignes.

Pour le filetage partiel des vis, une cale interposée entre les bords des peignes et la tête de la vis limite la longueur du filetage.

De même que pour le filetage en plongée avec molettes, la vis tourne sans translation

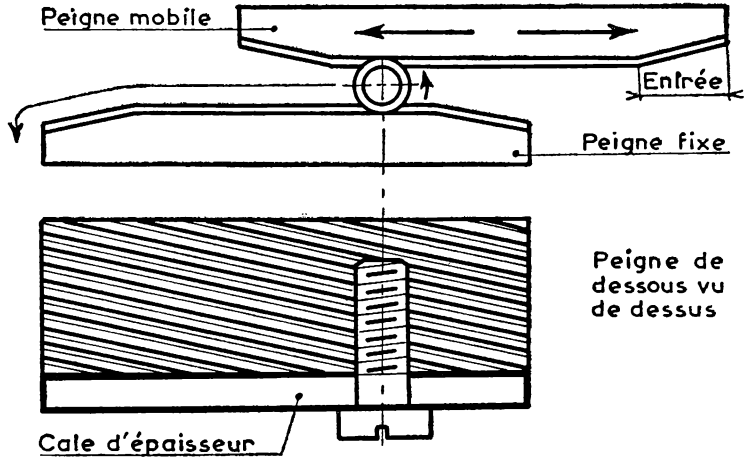


Fig:362- Filetage par roulage entre peignes.

Le taraudage

I. — GÉNÉRALITÉS

Le taraudage mécanique est effectué sur perceuses ou sur machines spéciales. Si le taraudage est inclus dans une phase de perçage, la perceuse est une multibroche en ligne et une des broches porte le taraud. On évite ainsi la reprise des pièces et il y a gain de temps de manipulation. Les machines spéciales sont conçues pour du taraudage exclusivement.

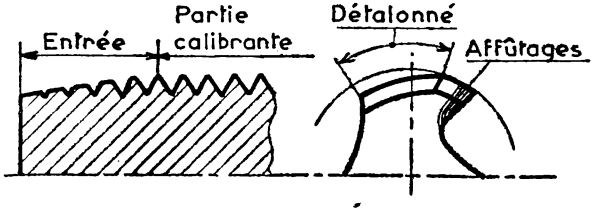


Fig:363- Taraud avec entrée et denture détalonnée partiellement.

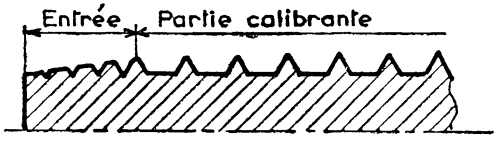


Fig:364-Taraud à denture alternée.

Afin de diminuer le frottement pièce-outil et, par suite, l'effort d'entraînement, les filets du taraud sont rectifiés et parfois détalonnés partiellement (fig. 363). Le détalonnage n'est valable que pour les taraudages débouchants, car au cours de la sortie du taraud par dévissage, les copeaux se logent entre la face détalonnée et la pièce et occasionnent la rupture de l'outil ou l'arrachement des filets de la pièce.

Pour les taraudages borgnes où le taraud doit revenir en arrière, le frottement est diminué par suppression d'un filet sur deux sur la partie calibrante du taraud en alternant un plein et un creux sur deux rangées consécutives de filets. Le taraud ainsi obtenu est dit à **denture alternée** (fig. 364).

II. — TARAUDAGE SUR PERCEUSE

A. SUR PERCEUSE ORDINAIRE.

1° Taraudage débouchant.

Le taraud est dit **à l'enfilade** (fig. 365). L'entrée est répartie sur huit à dix filets et la queue, de grande longueur, reçoit les pièces taraudées. Ce sont surtout les écrous ou autres pièces minces à taraudage débouchant qui sont taraudés à l'enfilade.

L'écrou est placé dans un logement de forme pratiqué dans le porte-pièce. Le taraud est engagé par pression sur le levier de la perceuse et dès qu'il a fait sa prise, la pression est supprimée et l'opérateur accompagne seulement l'outil dans sa descente. Au fur et à mesure de leur

taraudage, les écrous s'empilent le long de la queue du taraud. Quand la queue est garnie d'écrous, on démonte l'outil et on le retourne pour les évacuer.

Le démontage et le remontage de l'outil se font sans arrêt de la machine grâce à l'emploi d'un mandrin à montage rapide (mandrin type Presto par exemple).

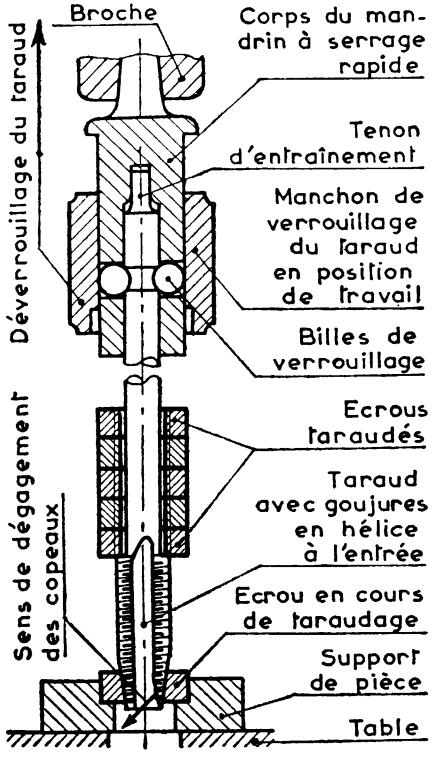


Fig:365- Taraudage à l'enfilade sur perceuse ordinaire.

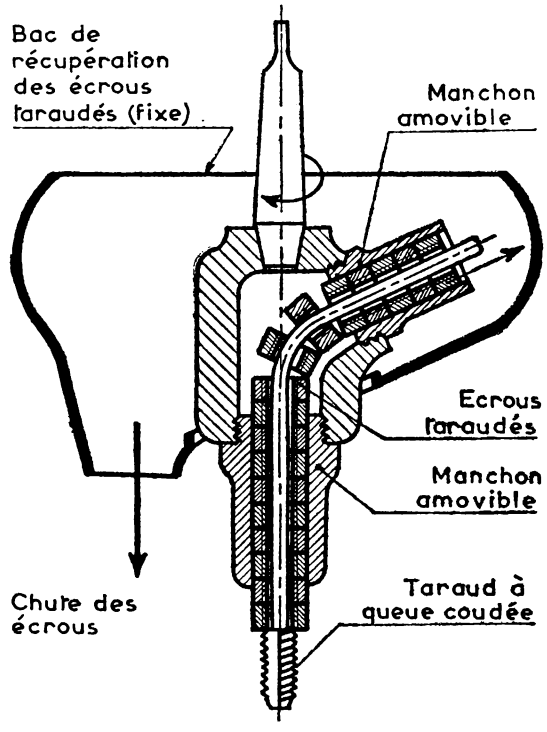


Fig:366- Taraudage à l'enfilade sur perceuse ordinaire

Pour diriger le copeau vers le bas, l'entrée du taraud est en hélice à gauche pour taraudage à droite. On a ainsi une arête oblique qui évite **le bourrage** et, par suite, la rupture du taraud.

Pour le taraudage continu, le taraud est à queue coudée (fig. 366). Avant la mise en marche, le taraud est logé dans son entraîneur, puis la queue est garnie d'écrous qui le guident et assurent sa suspension.

Au cours du taraudage. lorsque le dernier écrou est poussé hors de l'entraîneur, il est éjecté, sous l'effet de la force centrifuge. Un collecteur fixe à bord recourbé reçoit les écrous éjectés.

Certaines machines munies de cet appareil, taraudeuse Manhurin par exemple, assurent un taraudage automatique continu.

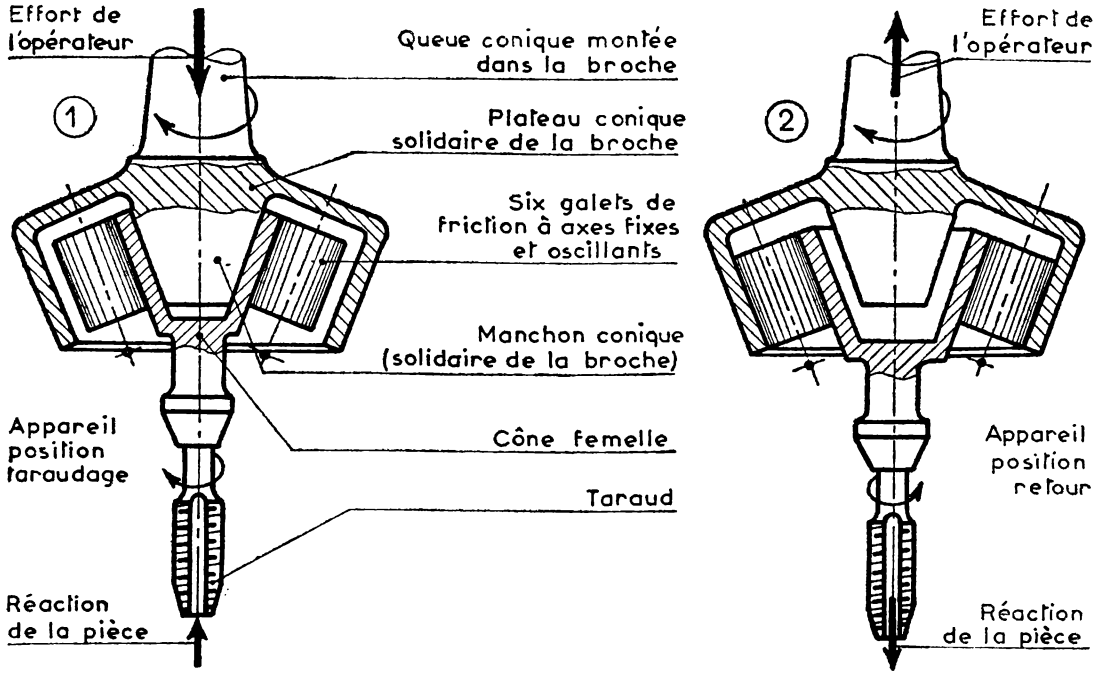


Fig:367- Schéma de principe d'un appareil à tarauder à friction sur perceuse ordinaire

2° Taraudage borgne.

Le dévissage de l'outil étant obligatoire dans ce cas, le porte-taraud est muni d'un système inverseur de marche (fig. 367).

L'appareil comprend six galets de friction qui ne jouent aucun rôle lors du taraudage (fig. 367-1). Quand la longueur de taraudage prévue est atteinte, la remontée manuelle de la broche met en contact les galets et le plateau conique, ce qui a pour effet de renverser le sens de marche du cône femelle qui porte le taraud (fig. 367-2). Le retour de l'outil est rapide car le plateau conique est d'un diamètre supérieur à celui du cône femelle.

Pour éviter **le bourrage**, on a intérêt à utiliser un taraud à goujures en hélice à droite, qui dirigent les copeaux vers le haut, d'où ils s'échappent plus facilement (fig. 368).

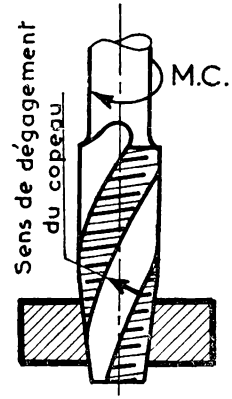


Fig.368- Taraud en hélice.

B. SUR PERCEUSE SPÉCIALE.

Ces machines ont leur propre inverseur de marche et reçoivent un appareil porte-taraud à friction dont la figure 369 est un type courant.

Quand le taraud bute au fond du trou (taraudage borgne), les *dents de loup* glissent les unes sur les autres et le taraud s'immobilise. L'inversion manuelle du sens de rotation de la broche provoque le dévissage du taraud.

La tension réglable du ressort de la friction est d'autant plus grande que le diamètre du taraud est plus fort.

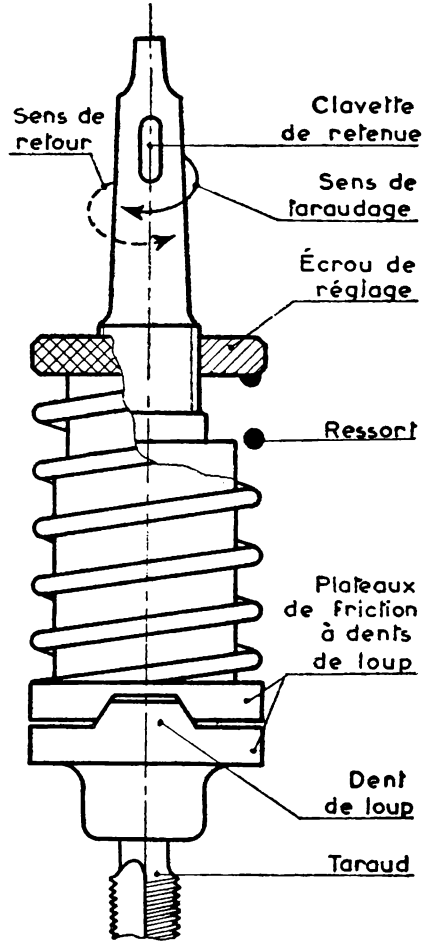


Fig: 369- Appareil à tarauder à friction sur perceuse à deux sens de marche.

III. — MACHINES SPÉCIALES A TARAUDER

La machine horizontale figure 370 en est un type classique.

La pièce est fixe en rotation. Deux roues ou poulies, folles sur la broche, tournent en sens contraires. Elles entraînent en rotation alternativement un double cône calé sur la broche qui peut se déplacer axialement sous l'effort de poussée (taraudage) ou de traction (détaraudage) imprimé par le porte-pièce à commande manuelle.

Différents systèmes de commande et d'alimentation peuvent rendre la machine automatique.

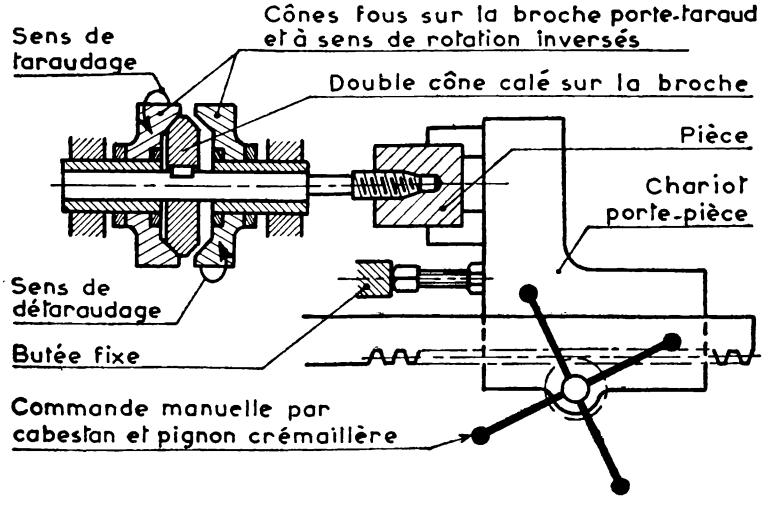

Cônes fous sur la broche porte-taraud et à sens de rotation inversés
Sens de taraudage
Double cône calé sur la broche
Pièce
Chariot porte-pièce
Sens de détaraudage
Butée fixe
Commande manuelle par cabestan et pignon crémaillère

Fig. 370 - Schéma de principe d'une machine à tarauder horizontale.

LES TRAVAUX DE TAILLAGE

Nous n'envisagerons dans ce chapitre que l'usinage des dentures d'engrenage mais, d'une manière plus générale, les travaux de taillage englobent la réalisation des cannelures et des dents de toute forme sur des solides de révolution ou plans.

Nous rappelons que deux roues dentées constituent un engrenage et qu'**une roue entraîne l'autre dans un rapport de vitesses constant. L'engrenage est donc un moyen de liaison positive.**

Les caractéristiques d'une roue dentée cylindrique à denture droite et à profil en développante de cercle (1) sont données par la figure 371.

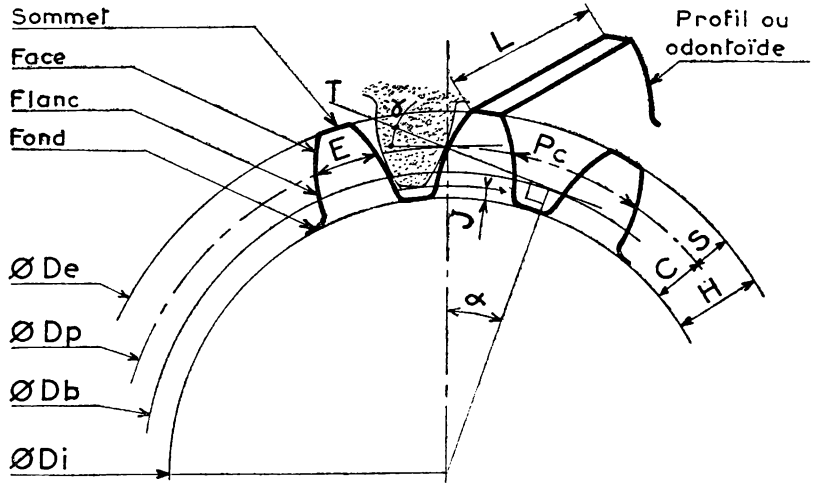


Fig:371- Caractéristiques d'une roue dentée à taille droite.

Pour le taillage des roues dentées, on utilise des **outils de forme** dont le profil correspond à celui du creux laissé entre deux dents ou des **outils d'enveloppe.** Les outils d'enveloppe travaillent par **reproduction** lorsqu'ils sont assujettis à suivre un gabarit reproducteur et ils travaillent par **génération** ou par **engrènement** lorsque leur profil est le conjugué du profil à obtenir (2). Dans ce cas, l'outil et la roue dentée constituent un engrenage, l'outil taillant son passage dans la roue.

---

(1) Voir le cours de mécanique pour l'étude cinématique des engrenages. Nous citerons leurs propriétés ou leurs éléments caractéristiques sans les justifier.

(2) Voir le cours de mécanique pour l'étude des profils conjugués.

I. — LES OUTILS

A. FRAISE AU MODULE (fig. 372).

L'outil est une fraise à profil constant. Elle ne peut réaliser qu'une taille approchée.

En effet, il faudrait, pour un même module, une fraise pour chaque nombre de dents à tailler, puisque le profil de la développante varie avec le diamètre du cercle de base. On s'est donc limité à une série de fraises pour chaque module :

— huit fraises jusqu'au module 8 inclus, prévues pour tailler les nombres de dents donnés par le tableau n° 6;

— quinze fraises pour les modules supérieurs à 8, car les erreurs de profil seraient trop importantes avec huit fraises seulement.

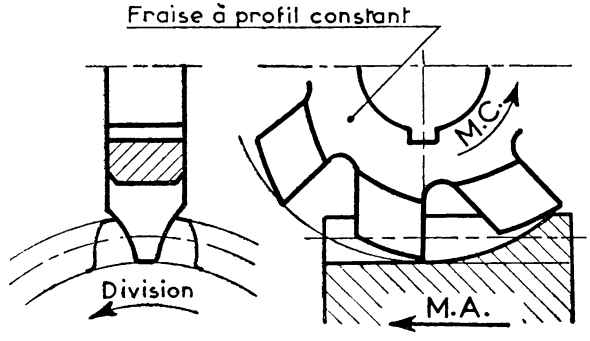


Fig:372- Taillage à la fraise au module.

Numéro de la fraise	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de dents à tailler	12 à 13	14 à 16	17 à 20	21 à 25	26 à 34	35 à 54	55 à 134	135 à la crémaillère

Tableau n° 6. — Numéros des fraises en fonction des nombres de dents jusqu'au module 8 inclus.

B. FRAISE BOUCHON (fig. 373).

C'est une fraise qui travaille en bout. On l'emploie pour les gros modules car son prix de revient est moins élevé que celui des fraises précédentes.

La fraise bouchon est aussi utilisée pour la taille des roues à chevrons dont la denture n'est pas dégagée dans la partie médiane (fig. 374). Le rendement de ce procédé de taillage est très faible.

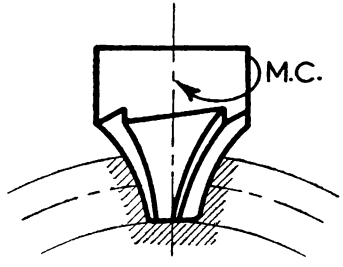


Fig:373- Fraise bouchon.

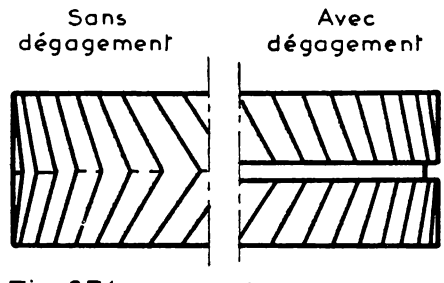


Fig:374- Roues à tailles en chevrons.

II. — LES MACHINES

La fraiseuse de l'atelier d'outillage ou d'entretien est utilisée pour le travail unitaire ou en petite série. La pièce est montée sur mandrin supporté par un diviseur (fig. 375). Après chaque passe, l'ouvrier fraiseur fait tourner la roue d'une division pour passer à la dent suivante (1).

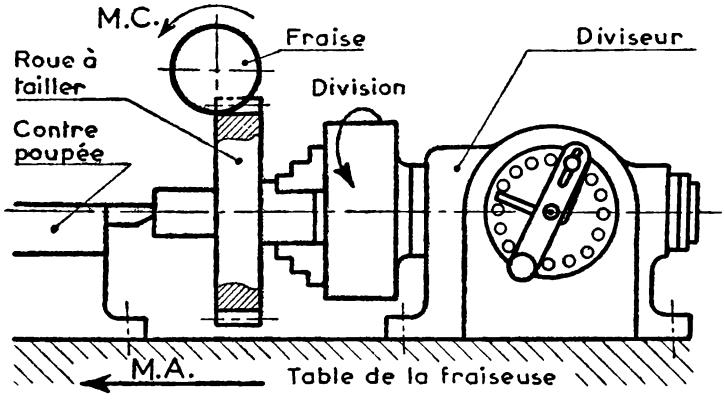


Fig:375- Taillage d'une roue à taille droite sur fraiseuse équipée d'un diviseur.

Pour une fabrication plus productive, il existe des machines spéciales qui présentent les particularités suivantes :

— les mouvements d'avance et de recul de la fraise et le mouvement de division sont automatiques ;

— l'arbre porte-fraise porte une ou deux fraises ébaucheuses et la fraise finisseuse (fig. 376).

Dans le cas du taillage d'une roue à denture hélicoidale il faut tenir compte de l'inclinaison de l'hélice qui conduit aux éléments suivants (fig. 377) :

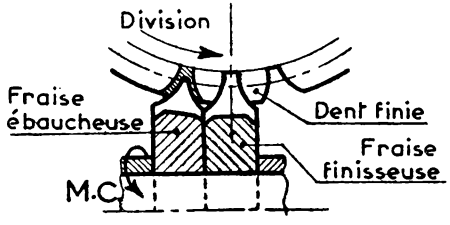


Fig:376- Train de fraises pour taillage à la fraise au module.

— pas apparent $\mathbf{P}_a = \frac{\pi \mathbf{D}_p}{\mathbf{Z}}$. Il est lié au diamètre primitif et au nombre de dents ;

— pas réel $\mathbf{P} = \mathbf{P}_a \times \text{Cos } \alpha$, α étant l'angle d'inclinaison de la tangente à l'hélice primitive. Il détermine l'intervalle réel entre deux dents perpendiculairement à leur direction ;

— module apparent $\mathbf{M}_a = \frac{\mathbf{P}_a}{\pi} = \frac{\mathbf{D}_p}{\mathbf{Z}}$ et module réel $\mathbf{M} = \mathbf{M}_a \times \cos \alpha$ qui détermine le choix de la fraise.

(1) Voir cours de « Spécialité fraisage ».

La fraise est inclinée d'un angle α par rapport à l'axe de la roue. Le diviseur doit assurer, en plus de la division correspondant au nombre de dents, la rotation de la pièce pendant son avance (1). Le choix de la fraise dans la série du module réel est déterminé par le nombre de dents

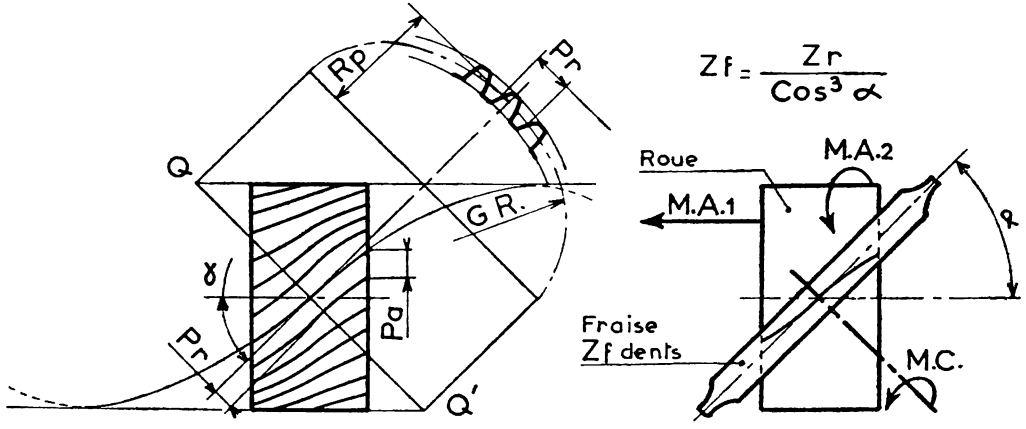


Fig:377- Denture hélicoïdale et son taillage.
Rp : Rayon primitif de la roue
GR. : Grand rayon de l'ellipse
α : Inclinaison de l'hélice et de la fraise

fictif $\mathbf{Z}_f$ qui correspondrait au pas réel et qui est défini par la relation $\mathbf{Z}_f = \frac{\mathbf{Z}\ (\text{réel})}{\cos^3 \alpha}$. La figure montre en effet que le profil normal correspond à celui d'une roue de rayon égal au grand rayon de courbure **GR** de l'ellipse obtenue par la section oblique de la roue par un plan de trace **QQ'** perpendiculaire à la tangente à l'hélice primitive.

TAILLAGE DES CRÉMAILLÈRES

La fraise est à flancs droits inclinés de 20°, angle de pression normalisé, pour le profil en développante de cercle (fig. 378). Elle est à denture fraisée car son affûtage est facile. Son diamètre est plus grand que celui des fraises pour roues cylindriques afin de pouvoir l'engager suffisamment sans que la pièce ne vienne buter sur le moyeu de la broche. Pour la même raison, les fraiseuses universelles (type Huré par exemple) sont équipées d'une tête spéciale qui permet l'approche suffisante de la broche par rapport à la table.

Le passage d'une dent à l'autre est assuré par un diviseur placé en bout de la vis de commande de la table.

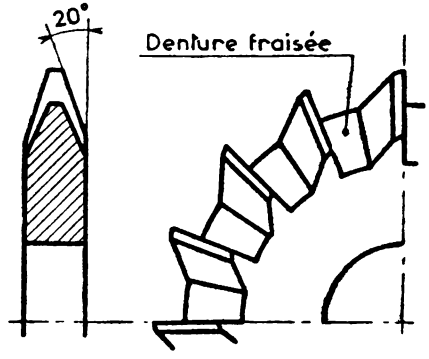


Fig:378 - Fraise pour taillage des crémaillères.

(1) Voir cours de « Spécialité fraisage ».

I. — PROFILS CONJUGUÉS EN DÉVELOPPANTE DE CERCLE

La figure 379 représente deux roues en contact. Lorsque la roue motrice, ou roue menante **R**, tourne autour de son axe, chaque dent qu'elle porte vient pousser la dent correspondante de la roue menée **R'**. Si les profils des dents restent constamment tangents l'un à l'autre au cours du mouvement, on dit qu'ils sont conjugués. Si l'un des profils est une développante de cercle, le profil conjugué est aussi une développante de cercle.

Au cours de la rotation, les cercles de base des développantes de cercle étant **B** et **B'** et leur tangente commune **T**, les points de contact 1 et 2 des profils restent sur la droite **T** dite droite de poussée et les profils sont normaux à cette droite. Par symétrie, les points 1' et 2' restent sur la tangente **T'**.

Le roulement et le glissement des odontoïdes l'une sur l'autre suivant les flèches **f** s'accompagnent de la rotation des roues comme si elles étaient réduites aux cercles primitifs **C** et **C'** tangents au point **P**. Cette rotation a lieu sans perte de vitesse par glissement, c'est-à-dire que le rapport des vitesses est égal au rapport inverse des rayons primitifs : $\frac{\omega_R}{\omega_{R'}} = \frac{\mathbf{O'P}}{\mathbf{OP}}$.

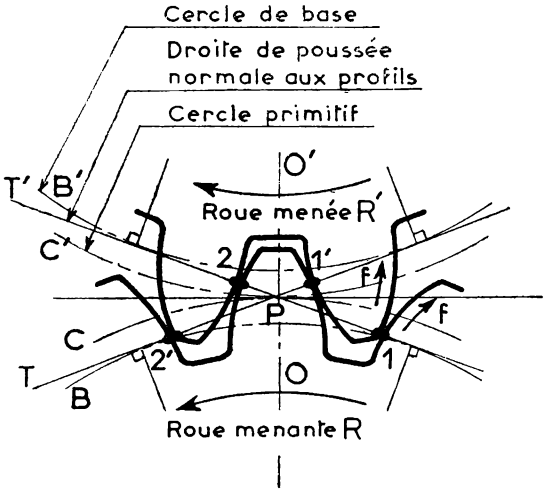


Fig:379- Les profils des roues R et R' sont des profils conjugués.

Si l'une des roues a un diamètre infiniment grand, son cercle primitif se ramène à une droite **D** (fig. 380) et le profil en développante se ramène à la droite normale à la droite de poussée **T**. Cette roue rectiligne est une **crémaillère**. Sa vitesse linéaire est $\mathbf{V} = \omega_R \times \mathbf{OP}$.

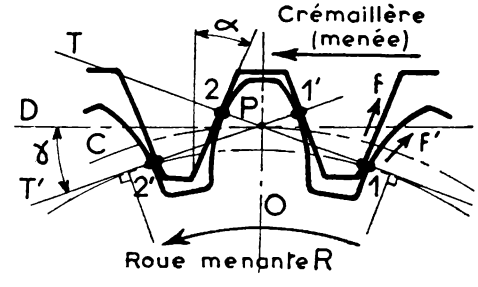


Fig:380- Les profils de la roue R et de la crémaillère sont des profils conjugués.

II. — PRINCIPE DE LA TAILLE PAR GÉNÉRATION

Puisqu'une crémaillère et une roue, ou deux roues, qui engrènent ensemble ont des profils conjugués, on peut imaginer que l'un des organes soit un outil à dents coupantes et taille l'autre en agissant sur lui à la manière d'un outil de rabotage.

Dans le cas d'un outil crémaillère (fig. 381) les mouvements conjugués sont une translation pour l'outil et une rotation pour la pièce. Au cours de ces mouvements, chaque génératrice 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, *n* des flancs de la crémaillère viendra en contact avec les génératrices correspondantes des flancs de la roue.

Si on sépare la crémaillère et la roue par un déplacement **MR** et si on donne les mouvements conjugués fractionnés 1, 2 ; 2, 3 ; 3, 4... pour revenir ensuite au contact par le déplacement **MC**, l'outil taillera son passage sur la roue et on obtiendra ainsi le profil de chaque dent successivement.

Si l'outil est une roue les mouvements conjugués sont des rotations pour l'outil et pour la pièce.

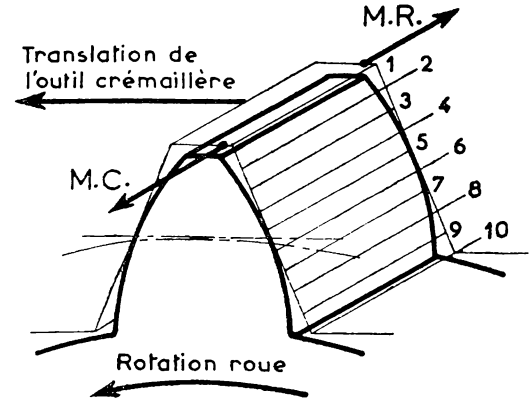


Fig. 381 - Principe du taillage par génération.

III. — TAILLAGE A L'OUTIL CRÉMAILLÈRE

A. L'OUTIL (fig. 382)

C'est une lame de quelques dents au profil de la crémaillère. Il est à flancs rectilignes pour le taillage des profils en développante de cercle. Ses dents sont détalonnées avec profil constant. Il travaille comme un outil de rabotage.

Souvent l'outil est constitué par une monture sur laquelle sont rapportées des plaquettes en acier rapide supérieur. L'affûtage se fait sur la face d'attaque. L'outil crémaillère est très simple à construire.

B. LE CYCLE DE TRAVAIL (fig. 383).

— La roue est réglée en position d'après la profondeur de taille. 1.

— L'outil reçoit alors son mouvement de coupe **MC**, course descendante. 2. La rotation **r** et la translation **t** conjuguées se font pendant la course de retour de l'outil tandis qu'un léger effacement suivant **f** évite son frottement contre la roue.

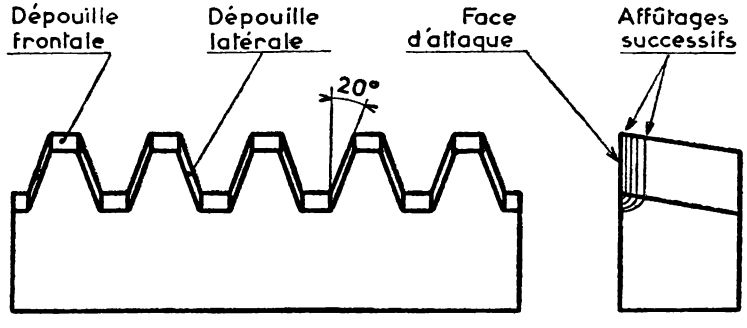


Fig. 382 - Outil crémaillère à profil constant.

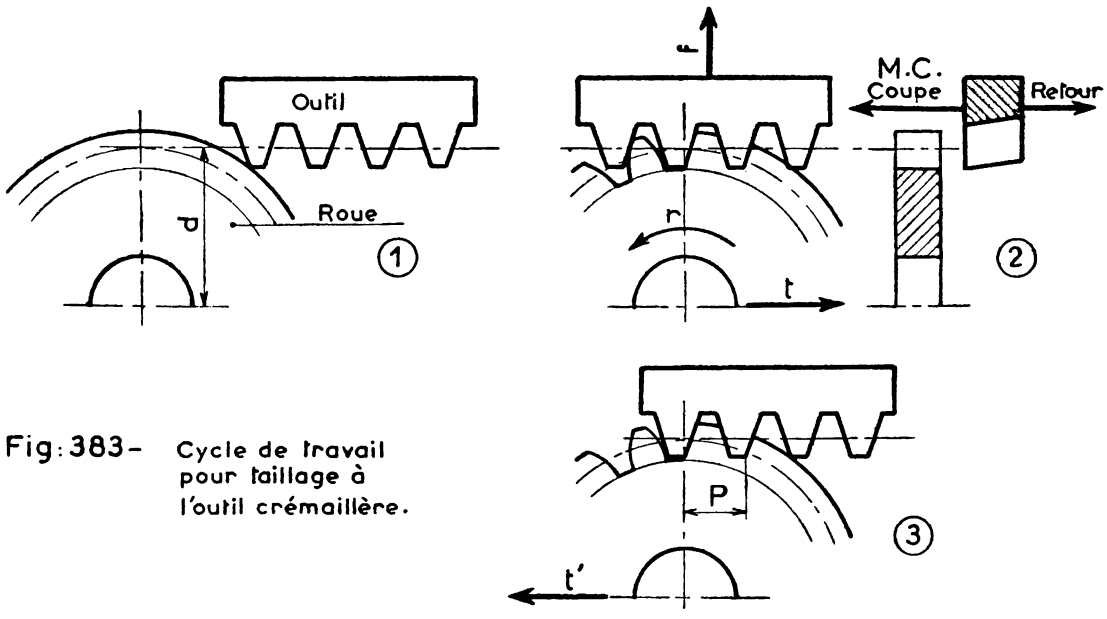


Fig:383- Cycle de travail pour taillage à l'outil crémaillère.

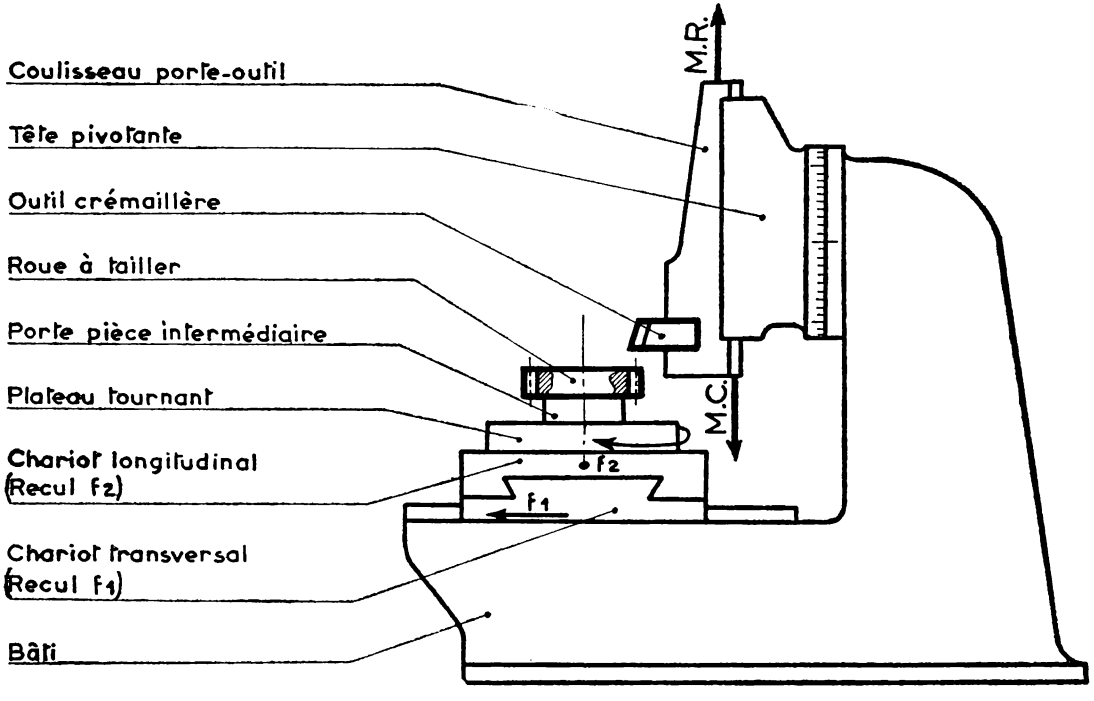


Fig:384- Machine à tailler Maag à outil crémaillère.

— L'outil n'étant pas suffisamment long pour tailler toute la roue, celle-ci recule en translation suivant t' d'un ou deux pas. 3. Ce recul a lieu lorsque l'outil est immobilisé en fin de course retour.

— L'outil et la roue reprennent leurs mouvements et le cycle recommence.

C. LES MACHINES

L'outil a son mouvement de coupe vertical (machine Maag) ou horizontal (machine Sunderland).

La figure 384 est la silhouette d'une machine Maag. Son allure générale est celle d'une mortaiseuse. La disposition pivotante de la tête porte-outil permet le taillage hélicoïdal.

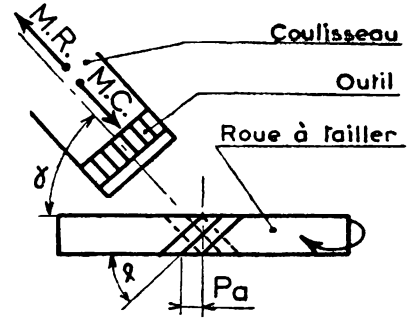


Fig:385- Taillage hélicoïdal.

D. TAILLAGE HÉLICOIDAL

L'outil crémaillère pour taille droite convient aussi pour le taillage hélicoïdal (fig. 385). Le coulisseau porte-outil est incliné d'un angle α égal à celui de la tangente à l'hélice primitive. Le recul périodique de la roue en translation suivant t' d'un ou deux pas est compté en pas apparents.

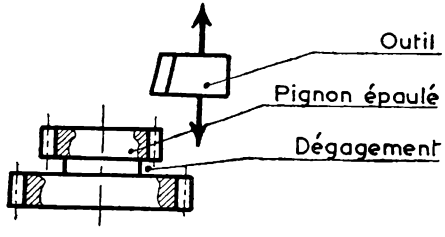


Fig: 386- Taillage droit à l'outil crémaillère d'un pignon étagé.

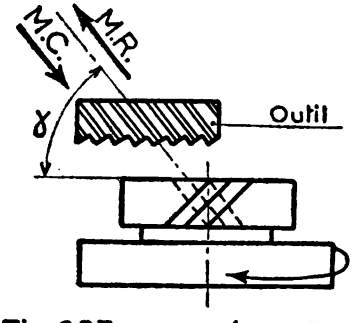


Fig:387- Outil crémaillère à denture inclinée pour taillage hélicoïdal de pignons étagés.

E. POSSIBILITÉS DE TAILLAGE A L'OUTIL CRÉMAILLÈRE

Elles se limitent aux taillages extérieurs droit, hélicoïdal, en chevron à denture dégagée (fig. 374) et au taillage des roues étagées (fig. 386). Les roues étagées à taille hélicoïdale nécessitent un outil à denture inclinée (fig. 387). L'affûtage ramène la face d'attaque normale à la denture de l'outil.

IV. — TAILLAGE A L'OUTIL PIGNON

A. L'OUTIL (fig. 388).

L'outil a la forme d'un pignon dont les dents sont détalonnées à profil constant. On l'appelle aussi couteau Fellows du nom de son inventeur constructeur.

Un seul outil peut tailler toutes les roues d'un même module. Il est à taille droite pour les dentures droites, à taille hélicoïdale pour les dentures hélicoïdales, mais d'hélice contraire (fig. 389). Son affûtage sur la face d'attaque peut provoquer une pente effective de coupe θ. Pour un outil à taille hélicoïdale, la face d'attaque est ramenée normale à la direction de chaque dent (fig. 389).

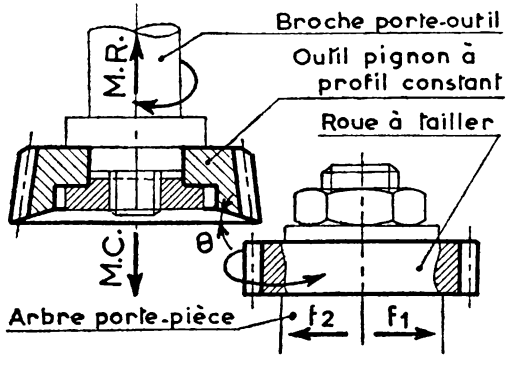


Fig:388- Principe du taillage à l'outil pignon.

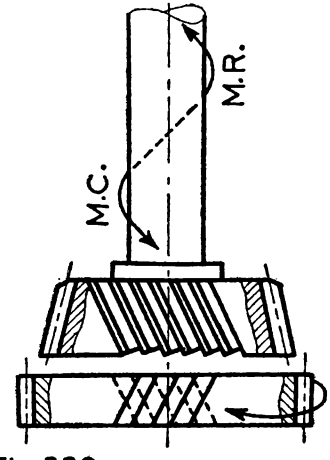


Fig:389-Taille hélicoïdale au couteau Fellows.

B. LE CYCLE DE TRAVAIL (fig. 388).

— L'outil étant placé tangent à la pièce, les mouvements de génération sont amorcés. En même temps, l'outil reçoit son mouvement de coupe et s'enfonce dans la pièce jusqu'à profondeur d'ébauchage.

— Après un tour de pièce, l'ébauchage est terminé, un nouvel enfoncement de l'outil a lieu pour la finition obtenue après un nouveau tour de pièce. Le taillage est alors terminé.

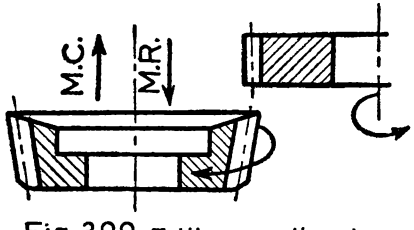


Fig:390-Taillage en tirant.

Pendant le mouvement de retour de l'outil, il y a un léger dégagement de la roue suivant $\mathbf{f}_1$ afin d'éviter tout frottement pièce-outil.

L'outil peut travailler en poussant (fig. 388) ou en tirant (fig. 390). Cette dernière position de l'outil est recommandée car elle évite la déformation de la broche porte-outil par flambage.

La liaison pièce-outil est positive et l'on doit avoir $\frac{\mathbf{N}\text{ tr outil}}{\mathbf{N}'\text{tr pièce}} = \frac{\mathbf{Z}'\text{ dents pièce}}{\mathbf{Z}\text{ dents outil}}$, condition nécessaire pour que les mouvements conjugués répondent aux caractéristiques de la roue à tailler.

C. LES MACHINES

Les principaux constructeurs de machines de ce type sont Fellows, Herbert, Reinecker et Michel en France sous licence Fellows.

La figure 391 est la chaîne cinématique des mouvements principaux d'une machine Fellows normale (1).

Le moteur, par l'intermédiaire de deux boîtes de vitesses, commande les arbres 1 et 2. L'arbre 1 distribue les mouvements de génération tandis que l'arbre 2 commande le mouvement de coupe. Des arbres 1 et 2 aux organes récepteurs, la liaison positive est assurée par roues

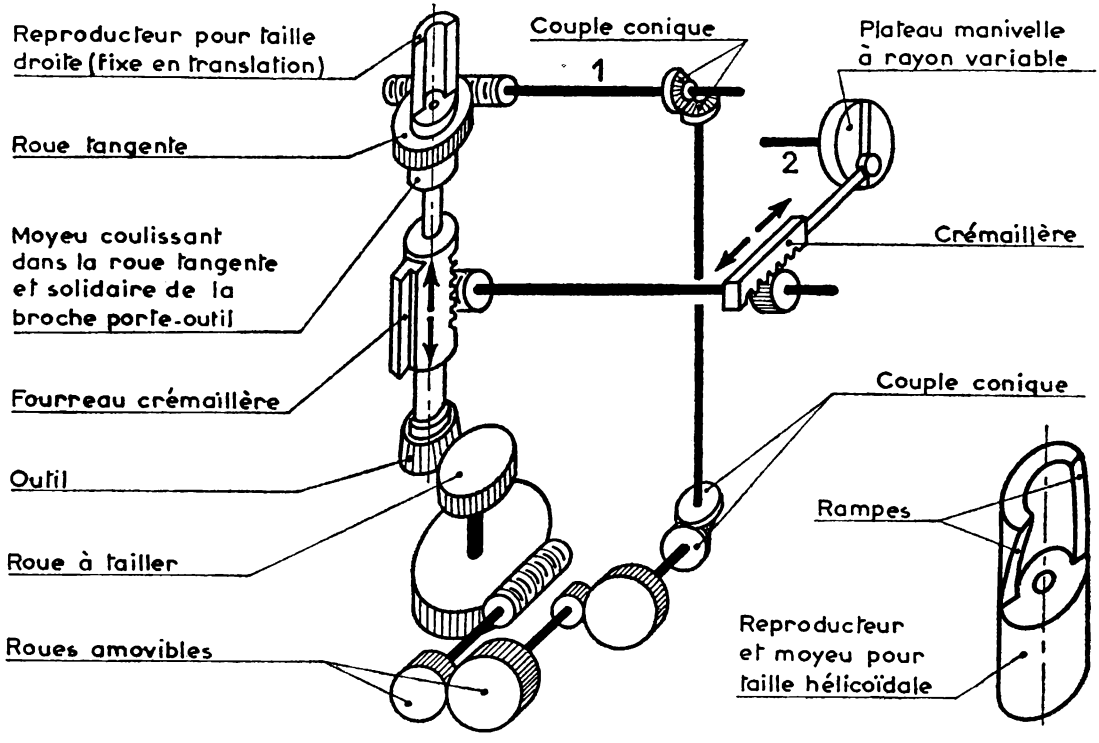


Fig. 391 – Chaîne cinématique des mouvements principaux d'une machine à tailler Fellows.

(1) Il existe également une machine Fellows rapide.

dentées et crémaillères. Les rampes de guidage du reproducteur imposent la forme de la trajectoire d'un point de l'outil ; elles sont rectilignes pour la taille droite et en hélice pour la taille hélicoïdale.

D. POSSIBILITÉS DU TAILLAGE A L'OUTIL PIGNON

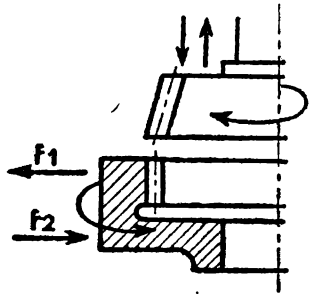


Fig.392- Taillage intérieur à l'outil pignon.

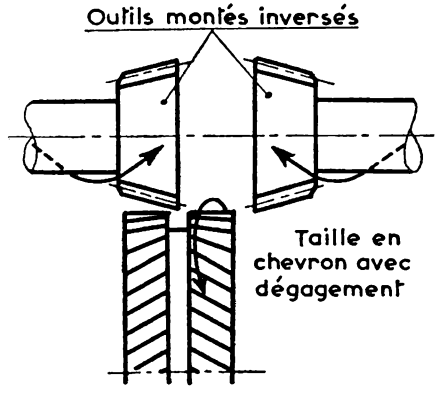


Fig.393- Taillage en chevron à l'outil pignon.

En plus des possibilités citées pour l'outil crémaillère, l'outil pignon est le seul qui permette le taillage intérieur (fig. 392). Un dégagement en fin de denture est nécessaire pour assurer le détachement du copeau.

Pour la taille en chevron (fig. 393) deux outils sont montés en opposition, chacun sur sa broche particulière. Deux reproducteurs à rampes hélicoïdales de sens opposés assurent la rotation d'un outil pendant son mouvement de coupe et la rotation de l'autre outil pendant son retour. Chaque broche porte-outil possède son dispositif particulier d'escamotage dégageant légèrement l'outil pendant sa course retour.

V. — TAILLAGE A LA VIS FRAISE

A. CINÉMATIQUE DU SYSTÈME ROUE ET VIS SANS FIN (fig. 394).

Dans ce système, la vis peut être assimilée à une crémaillère rotative ou à une roue dentée dont le nombre de dents est le nombre de filets dans le pas de la vis. Il en résulte que le taillage par engrènement est applicable aux deux dentures conjuguées.

Le rapport des vitesses est :

$$\frac{\omega \text{ vis}}{\omega' \text{ roue}} = \frac{\mathbf{N} \text{ tr vis}}{\mathbf{N}' \text{ tr roue}} = \frac{\mathbf{Z}' \text{ dents roue}}{\mathbf{Z} \text{ filets vis}}$$

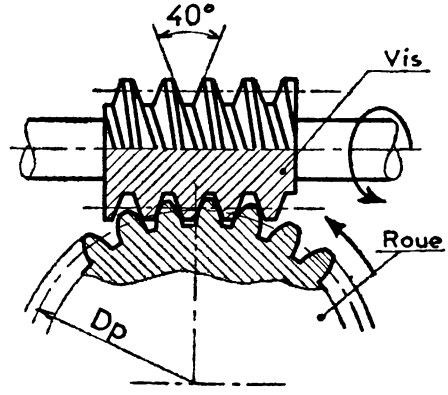


Fig.394- Schéma du dispositif roue et vis sans fin.

B. PRINCIPE DU TAILLAGE A L'OUTIL VIS-FRAISE

L'outil, appelé aussi fraise-mère (fig. 395), est à filet trapézoïdal ouvert de 40° pour le profil en développante de cercle. Des rainures hélicoïdales et longitudinales, sont creusées normalement à l'hélice des filets afin de former sur chacun d'eux des dents coupantes.

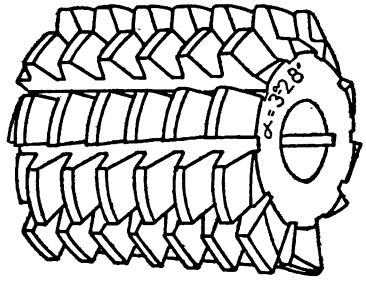


Fig:395-Vis-fraise ou fraise-mère.

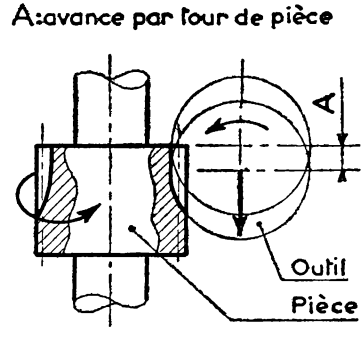


Fig:396- Le taillage à la fraise-mère est progressif.

Les dents sont ensuite détalonnées et la fraise devient un outil à profil constant. Les rangées de dents peuvent être comparées à autant de crémaillères qui viendront tour à tour tailler la roue au cours des rotations conjuguées.

L'avance de la fraise, parallèle à l'axe de la roue, détermine un taillage progressif (fig. 396). Le taillage n'est terminé qu'après un nombre de tours de la roue qui, multiplié par l'avance **A** par tour donne un déplacement utile de l'outil égal à la longueur de la denture.

C. POSITIONNEMENT DE LA FRAISE-MÈRE

Dans le cas d'une taille droite, en appelant ω l'inclinaison de la fraise et α l'angle de la tangente à son hélice primitive, on a $\omega = \alpha$ (fig. 397). La valeur de l'angle α est gravée en bout de la fraise-mère.

Si la roue est à taille hélicoïdale, inclinée de β, l'angle d'inclinaison ω de la fraise varie selon qu'elle est à droite (fig. 398) ou à gauche (fig. 399). La relation générale entre ces trois angles, est en valeur et en signe, $\omega = \beta \pm \alpha$.

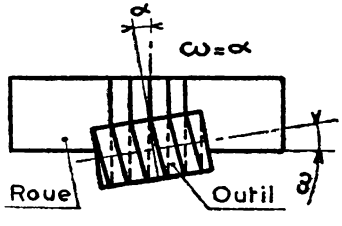


Fig:397- Taillage droit avec fraise-mère à droite.

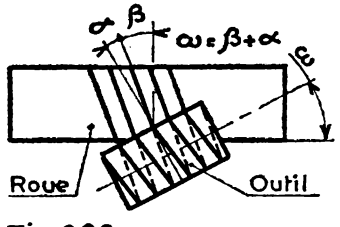


Fig:398- Taillage hélicoïdal à gauche avec fraise-mère à droite.

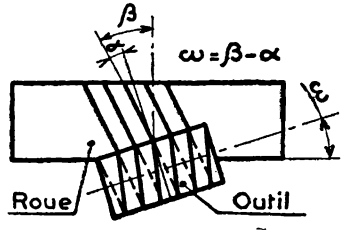


Fig:399- Taillage hélicoïdal à gauche avec fraise-mère à gauche.

D. LIAISON OUTIL-PIÈCE

Comme dans les cas précédents, la liaison outil-pièce doit être sans glissement, donc positive.

1° **Taille droite** (fig. 400).

Pour un tour de pièce, l'avance **A** de la fraise a lieu suivant une génératrice de la roue et le point **a** est venu en **a'** sans décalage latéral entre le point d'attaque et le point d'arrivée de la fraise. La liaison pièce-outil doit rester dans le rapport donné précédemment soit :

$$\frac{\mathbf{N}\ \text{tr fraise}}{\mathbf{N'}\ \text{tr roue}} = \frac{\mathbf{Z'}\ \text{dents roue}}{1}$$

pour une fraise-mère à un filet, rapport qui montre que le nombre de tours de fraise par tour de roue est grand et que, par suite, le temps de taillage est long. On peut l'abréger par l'emploi d'une fraise à plusieurs filets, trois par exemple. On a alors : $\frac{\mathbf{N}}{\mathbf{N'}} = \frac{\mathbf{Z'}}{3}$

Mais la pratique révèle que le travail est moins soigné, c'est pourquoi les fraises-mères à plusieurs filets sont plutôt réservées à l'ébauche.

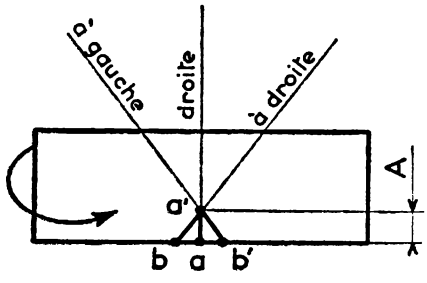


Fig:400- Décalage de la roue en rapport avec l'inclinaison de sa taille.

2° **Taille hélicoïdale** (fig. 400).

Pour une avance **A** par tour de pièce, dans le cas d'un taillage hélicoïdal à droite, le point **b** est venu en **a'**. La roue a donc tourné, par rapport à la même position **aa'** de l'outil d'une fraction **ba**. Si le taillage était à gauche, la roue subirait un décalage **ab'** en moins.

Il y a donc une correction à apporter au calcul des roues commandant la rotation de la roue à tailler. Cette correction est obtenue par l'adjonction d'un différentiel dans la chaîne cinématique de la machine.

E. LES MACHINES

Selon le type de machine la pièce a son axe horizontal (la fraise se déplace horizontalement) ou vertical (la fraise se déplace verticalement). Cette dernière disposition est celle représentée par la figure 401 qui donne l'allure générale de la machine. Si, en plus de la taille droite, on peut effectuer la taille hélicoïdale, la machine est dite universelle.

Le chariot porte-fraise est dit chariot de centrage de la fraise sur la pièce. Il permet aussi la translation de la fraise sur son axe afin d'obliger toutes les dents de la fraise à occuper la position de coupe. En effet, si l'outil occupait toujours la même position par rapport à l'axe de la pièce, ce seraient toujours les mêmes dents qui travailleraient et perdraient leur pouvoir de coupe. Leur affûtage entraînerait celui des dents non usées en pure perte.

La figure 402 est le schéma de la chaîne cinématique d'une machine du type ci-dessus.

Lorsque son boîtier est immobile (roue **R** débrayée), le différentiel ne joue aucun rôle et la machine est équipée pour le taillage parallèle à l'axe de la pièce (taille droite).

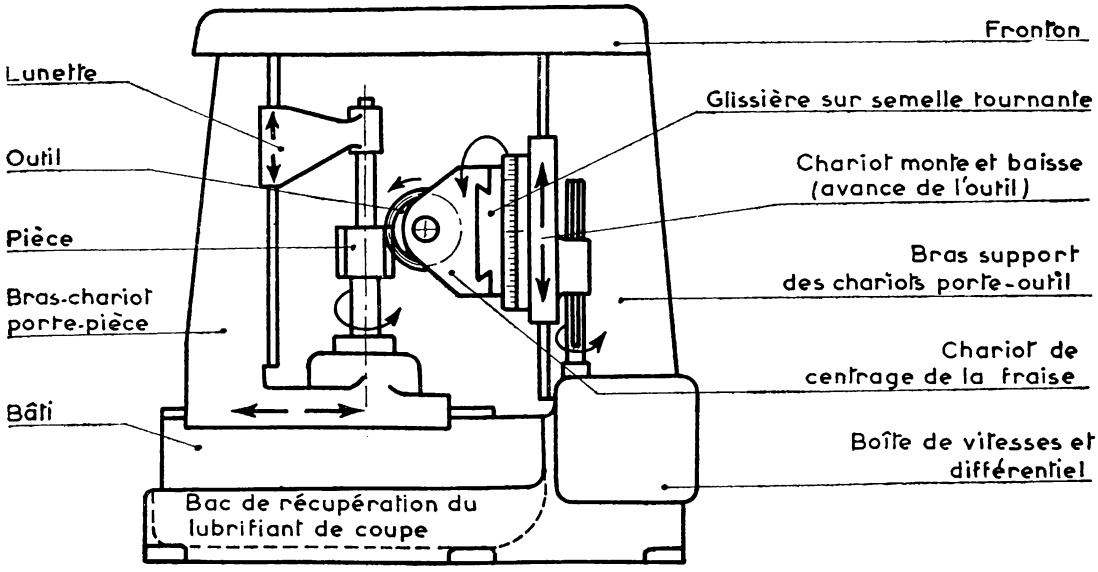


Fig:401- Type de machine verticale universelle à tailler à la vis-fraise.

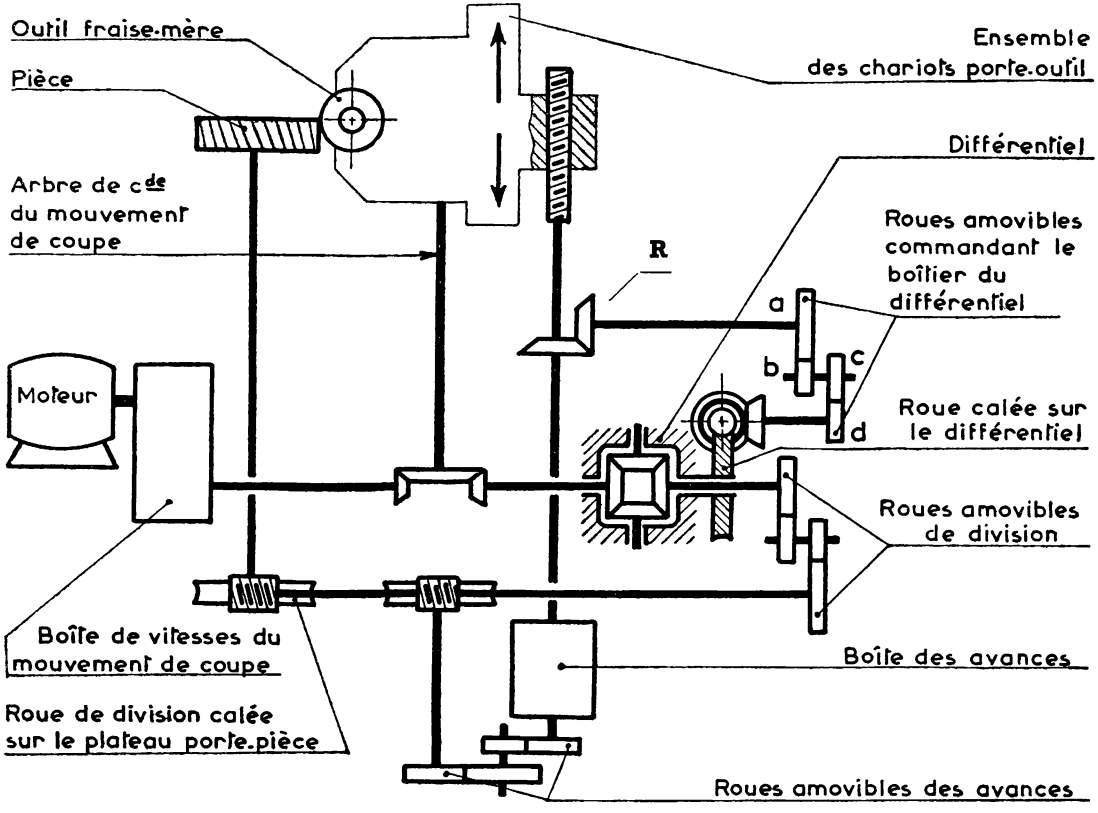


Fig:402- Chaîne cinématique d'une machine à tailler universelle.

Lorsque la liaison du différentiel est faite en partant de la chaîne des avances par la roue **R**, elle n'affecte pas le rapport de division mais elle retarde ou avance la position de la fraise par rapport au mouvement de division. Ce décalage est nécessaire pour l'obtention du taillage hélicoïdal (voir fig. 400).

Certaines machines sont munies des dispositifs nécessaires pour permettre la coupe en avalant. Dans ce cas, l'ébauche se fait avec coupe en opposition et la finition avec coupe en avalant qui donne un meilleur état de surface.

Remarque. — Un arbre cannelé peut être assimilé à un pignon dont le profil des dents est spécial. Il s'ensuit que l'arbre peut être taillé sur la machine précédente équipée d'une fraise au profil des cannelures. La flexion des arbres longs doit toujours être empêchée par une lunette.

VI. — TAILLAGE DES ROUES TANGENTES

Les roues tangentes, ou roues creuses, sont taillées à la fraise-mère ou à la vis-fraise conique.

A. TAILLAGE A LA FRAISE-MÈRE (fig. 403).

L'outil est une fraise-mère cylindrique identique à celle étudiée précédemment. Ses caractéristiques sont celles de la vis qui engrènera avec la roue.

L'avance se fait en plongée de l'outil dans la roue en direction radiale. Elle n'est applicable que si l'angle d'hélice α est inférieur à 8°. Dans le cas contraire l'outil talonne. La liaison outil-pièce est positive et l'on a $\frac{\omega \text{ roue}}{\omega' \text{ vis}} = \frac{\mathbf{Z}' \text{ filets vis}}{\mathbf{Z} \text{ dents roue}}$.

Le taillage peut être exécuté sur une machine à tailler les roues cylindriques par fraise-mère normale.

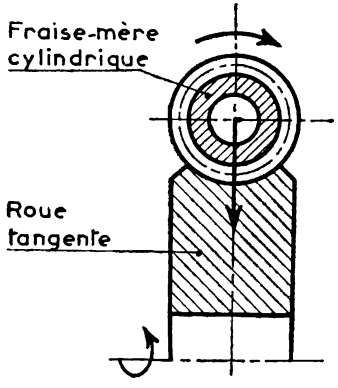


Fig:403- Taillage d'une roue tangente à la fraise-mère cylindrique.

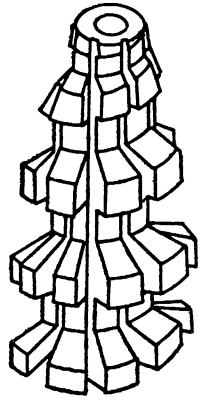


Fig:404- Vis-fraise conique.

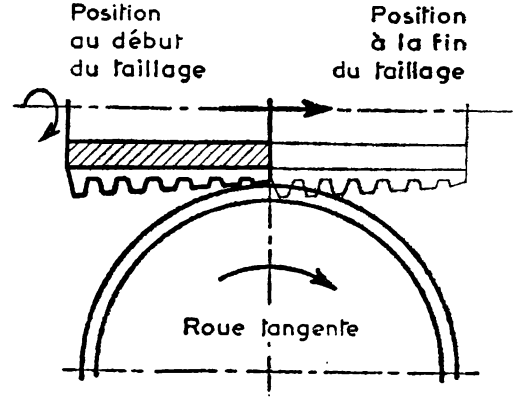


Fig:405- Taillage d'une roue tangente à la vis-fraise conique.

B. TAILLAGE PAR VIS-FRAISE CONIQUE

Pour une production plus poussée et quelle que soit la valeur de l'angle α on utilise une vis-fraise conique (fig. 404). Elle agit sur la pièce comme le ferait un taraud par avance axiale (fig. 405).

Mais il faut donner à la roue, après chaque tour, un mouvement complémentaire de même sens que l'avance de l'outil et d'angle au centre en radians

$$\frac{\theta \text{ roue}}{2\pi} = \frac{\mathbf{P}_a}{\pi \mathbf{D}_p} + \frac{\mathbf{l}}{\pi \mathbf{D}_p} = \frac{\mathbf{P}_a + \mathbf{l}}{\pi \mathbf{D}_p}$$

dans laquelle $\mathbf{P}_a$ est le pas apparent de la roue, $\mathbf{l}$ le déplacement axial de la fraise pour un tour de pièce et $\mathbf{D}_p$ le diamètre primitif de la roue. Ce déplacement complémentaire est obtenu par différentiel.

C. TAILLAGE A L'OUTIL MOUCHE (fig. 406).

Un grain, au profil de la vis qui doit engrener avec la roue, est monté sur une barre qui reçoit le mouvement de coupe et l'avance axiale complémentaire comme pour une vis-fraise. Mais l'outil étant unique, la rotation de la pièce est très lente.

Le procédé est néanmoins applicable lorsque le prix d'une vis-fraise ne peut être amorti pour quelques roues à tailler.

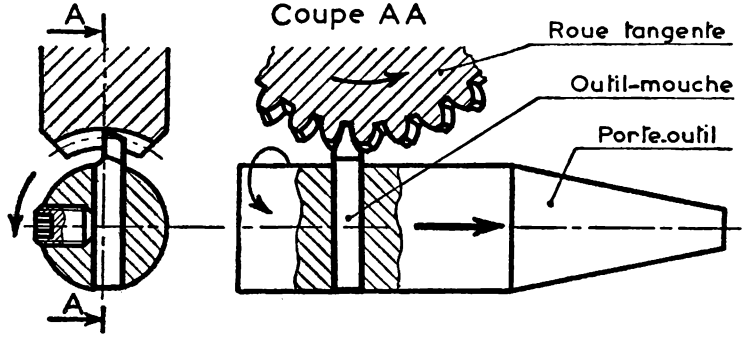


Fig. 406 - Taillage d'une roue tangente à l'outil-mouche.

VII. — TAILLAGE DES VIS SANS FIN

Il s'effectue à la fraise de forme a un seul profil ou à l'outil pignon.

A. A LA FRAISE DE FORME A PROFIL UNIQUE

Le procédé est identique à celui étudié au cours du filetage (revoir fig. 344).

B. A L'OUTIL PIGNON

Le taillage est réalisé sur une machine à fraise mère, la vis étant à la place de la fraise et l'outil à la place de la roue.

L'outil est à taille hélicoïdale (fig. 407) et il reçoit un mouvement d'avance complémentaire **a** donné par un différentiel en plus de son mouvement de rotation.

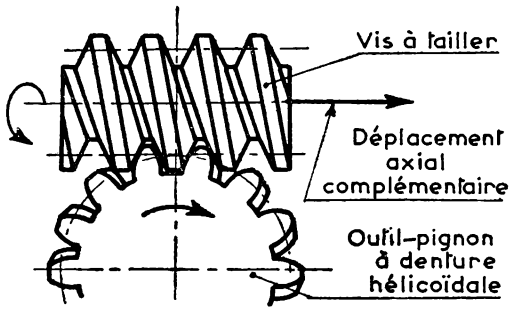


Fig:407- Taillage d'une vis sans fin à l'outil-pignon.

Taillage des pignons coniques

Lorsque les arbres liés par l'engrenage ne sont pas parallèles, on peut utiliser des pignons coniques pour la transmission du mouvement. Si les arbres sont concourants, les pignons sont à denture droite ou à denture spirale (fig. 408 et 409).

Pour des arbres rectangulaires (non concourants) seule une taille spirale particulière est applicable (denture dite hypoïde).

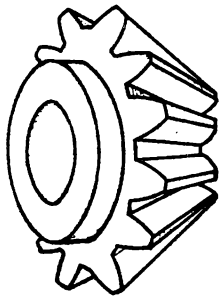


Fig:408- Pignon à denture droite.

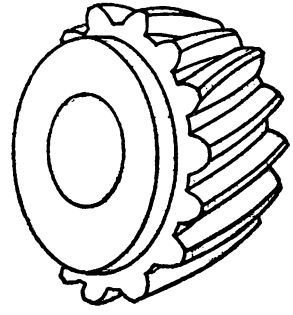


Fig:409- Pignon à denture spirale.

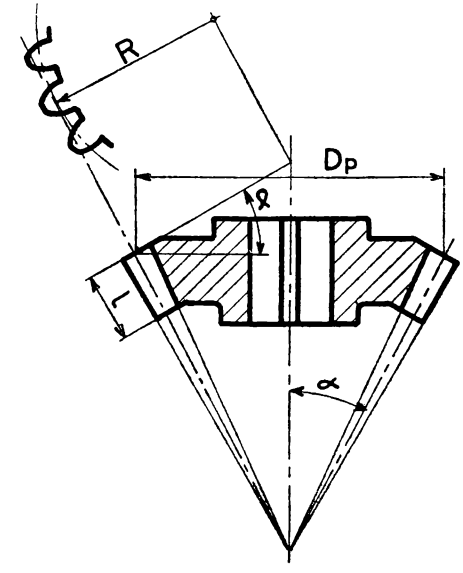


Fig: 410- Roue dentée conique.

CARACTÉRISTIQUES D'UNE ROUE CONIQUE

Ce sont principalement :

— le diamètre primitif $\mathbf{D}_p$ mesure sur le gros bout de la denture;

— l'angle primitif α égal au demi-angle au sommet du cône primitif;

— le module $\mathbf{M} = \dfrac{\mathbf{D}_p}{\mathbf{Z}}$;

— le pas circonférentiel $\mathbf{P}_c = \mathbf{M}\pi$.

Pour un engrenage de couple conique le rapport des vitesses est :

$$\frac{\omega}{\omega'} = \frac{\mathbf{N}}{\mathbf{N}'} = \frac{\mathbf{Z}'}{\mathbf{Z}} = \frac{\sin \alpha'}{\sin \alpha}$$

La longueur de la dent $\mathbf{l} = 4$ à $10\,\mathbf{M}$.

---

(1) Voir « Cours de mécanique ».

Pour obtenir le profil de la denture, on développe le cône complémentaire et on considère la roue cylindrique tracée sur ce développement et dont le cercle primitif a pour rayon $\mathbf{R} = \frac{\mathbf{D}_p}{2 \cos \alpha}$

TAILLAGE DES DENTURES DROITES

Les deux procédés applicables sont : le taillage par reproduction et le taillage par génération.

I. — TAILLAGE PAR REPRODUCTION

A. PRINCIPE (fig. 411).

L'outil est un outil d'enveloppe de rabotage. Il façonne une figure homothétique d'un gabarit par rapport au centre d'homothétie confondu avec le sommet du cône primitif.

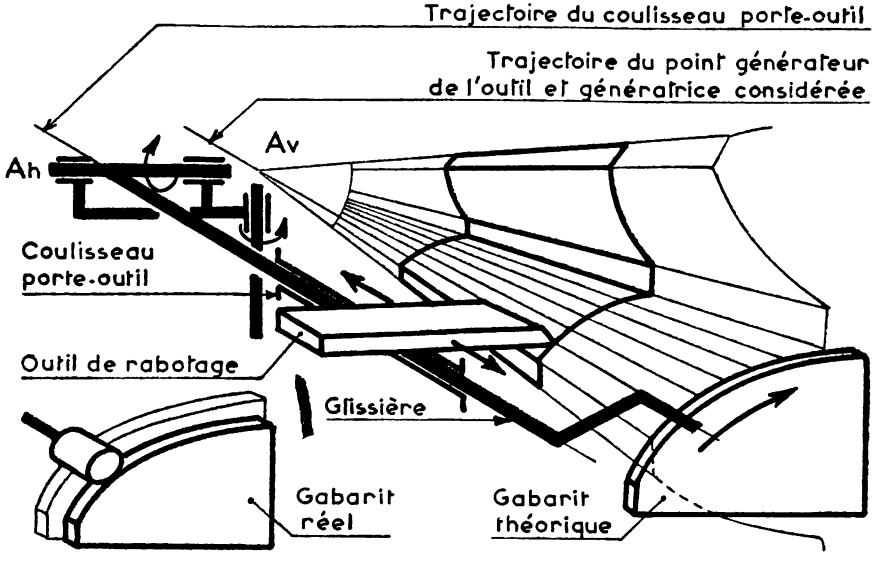


Fig. 411 – Principe du taillage par reproduction.

La trajectoire du point générateur de l'outil est une génératrice de la face et du flanc de la dent usinée. La glissière qui guide le coulisseau porte-outil doit donc lui donner une trajectoire parallèle à la génératrice considérée. Par suite, elle doit pivoter autour d'un axe horizontal $\mathbf{A}_h$ qui doit pouvoir lui-même tourner autour d'un axe vertical $\mathbf{A}_v$, ces deux axes concourant au sommet du cône primitif du pignon.

L'appui étant constitué par un galet, le profil du calibre réel est l'enveloppe déterminée par points des positions du galet dont l'axe parcourt le profil théorique.

B. LES MACHINES

Certaines machines, destinées au taillage des roues de grandes dimensions, sont, comme le montre la figure 411, à un seul outil.

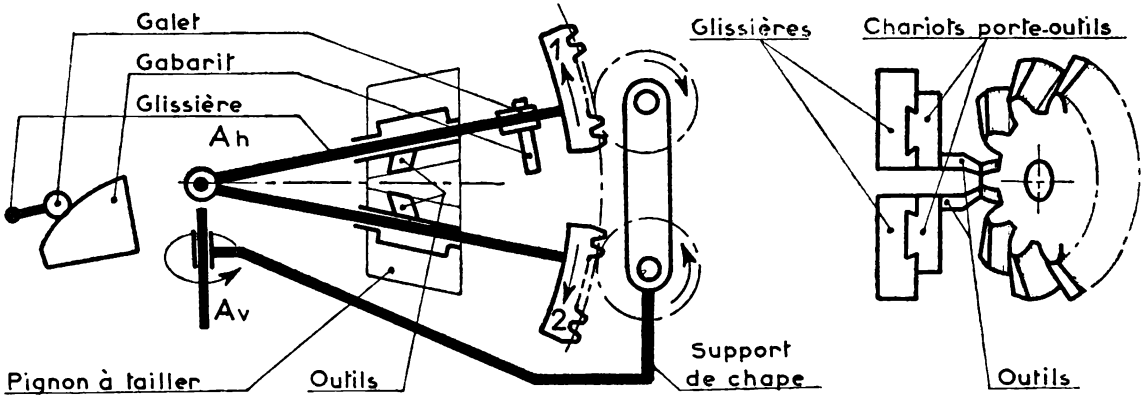


Fig. 412 - Schéma de principe de la machine "Zimmermann" à deux outils

Pour les roues de plus petites dimensions et pour augmenter la production, les machines portent deux outils qui taillent simultanément les profils opposés d'une même dent.

La conjugaison des deux outils, dans la machine Zimmermann (fig. 412), est obtenue par deux secteurs dentés accouplés par deux pignons cylindriques qui jouent le rôle d'inverseurs. Les deux pignons cylindriques sont maintenus par une chape soutenue par un bras qui peut tourner autour de l'axe vertical qui passe par le sommet du cône primitif.

Lorsque les outils travaillent, le pignon à tailler est immobile. Une dent étant taillée, les outils se dégagent, s'arrêtent, le pignon tourne d'une dent par l'intermédiaire d'un diviseur porte pièce, puis le cycle de taillage recommence.

Le travail est beaucoup facilité si les pignons à tailler sont préalablement ébauchés à la fraise module ou par outil à défoncer.

II. — TAILLAGE PAR GÉNÉRATION

A PRINCIPE DE LA GÉNÉRATION

Considérons la couronne **C** d'axe **x** et le cône $\mathbf{C_1}$ de sommet **S** dans le plan de **C** et d'axe **y** (fig. 413).

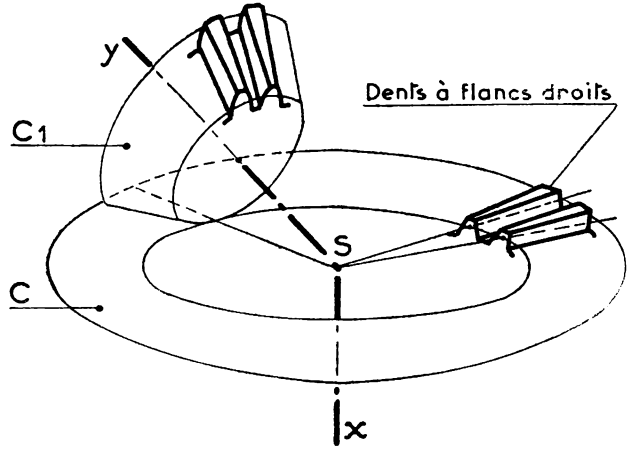


Fig. 413 - Principe de la roue plate ou crémaillère conique.

Si nous faisons tourner la couronne **C** autour de son axe **x** supposé fixe, elle entraînera le cône C_1 qui tournera autour de son propre axe **y** supposé fixe. Si la couronne **C** et le cône C_1 sont munis de dents convergeant au sommet **S**, le système constitue un engrenage conique. La couronne **C** est une roue d'angle au sommet égal à 180°; elle prend le nom de **roue dentée plate** ou **roue plate** ou encore **crémaillère conique.** En effet, le profil des dents, pour une odontoïde en développante de cercle, est à flancs droits comme pour la crémaillère rectiligne.

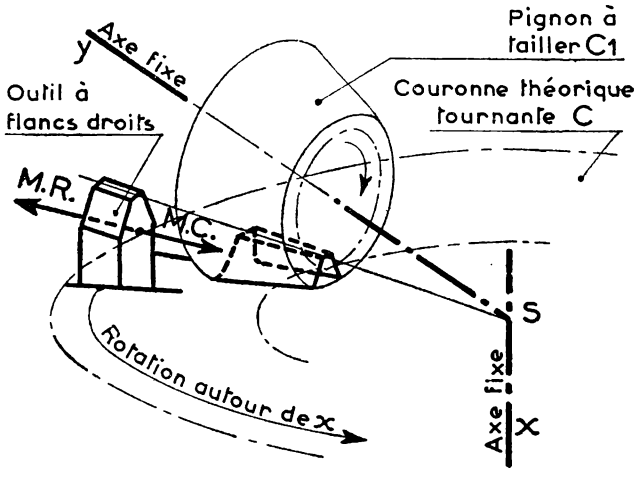


Fig: 414 - Principe de la génération sur machine "Gleason"

Si nous faisons tourner le cône C_1 autour de son axe **y supposé fixe,** il entraînera la couronne **C** qui tournera autour de **x.** En supposant alors que la couronne porte un outil à mouvement alternatif convergeant vers **S** et qu'elle tourne avec un cône à tailler tel que C_1, et sans glissement, l'outil y creusera son passage et engendrera un profil de dent conjugué du sien. C'est le principe **de la** machine Gleason (voir fig. 414).

Si enfin nous faisons tourner l'**axe y** du cône C_1 autour de l'axe **x** supposé fixe et si nous **immobilisons la couronne C,** le cône C_1 tournera à la fois autour de l'axe **x** et autour de son propre axe **y.** En supposant alors qu'un cône à tailler tel que C_1 soit animé de ce double mouvement et qu'un outil ait un

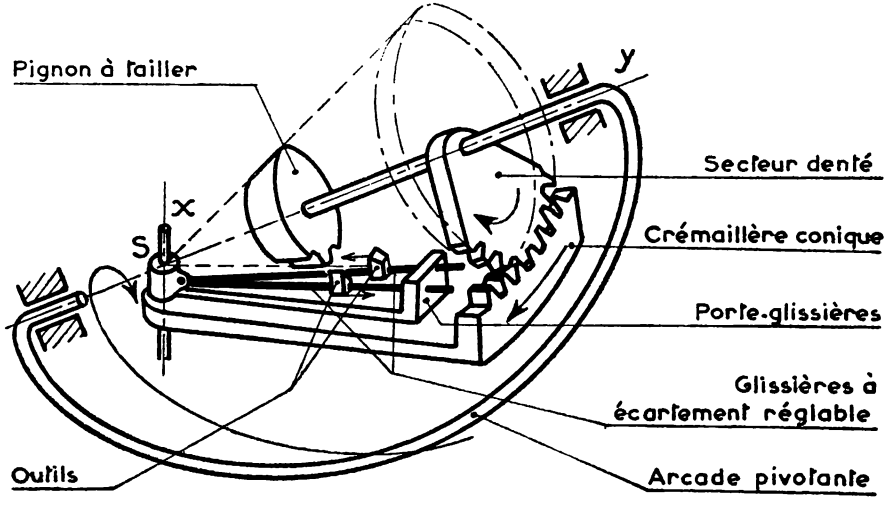


Fig: 415 - Schéma de la machine "Gleason"

mouvement alternatif de direction fixe convergeant vers **S**, il y creusera son passage et engendrera un profil de dent conjugué du sien. C'est le principe de la machine Reinecker (fig. 417).

B. MACHINE GLEASON (fig. 414 et 415).

L'outil reçoit le mouvement de coupe et, en même temps, une rotation autour de l'axe fixe **x** ; la pièce, liée au secteur denté, tourne autour de l'axe **y** également fixe.

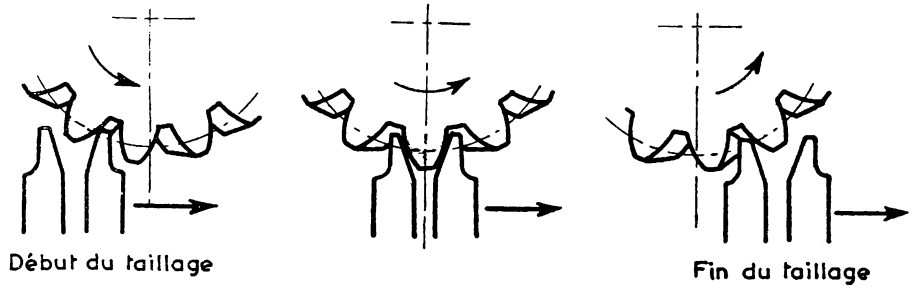


Fig:416- Génération d'une dent sur machine "Gleason"

La rotation du secteur denté et, par suite, celle de la crémaillère conique qui remplace la couronne théorique, sont obtenues par pivotement de l'arcade autour de l'axe **x**. Ce pivotement est obtenu par l'action de cames et de leviers.

En réalité, il n'y a pas un seul outil mais deux outils conjugués qui taillent, simultanément les flancs et les faces de la même dent (fig. 416). Pour éviter leur rencontre vers le sommet du cône primitif leur marche est alternée : un outil coupe alors que l'autre recule.

C. MACHINE REINECKER (fig. 417 et 418).

La trajectoire du mouvement de coupe de l'outil est fixe. Le pignon a deux mouvements conjugués :

— rotation autour de son axe **y**.

— rotation autour de l'axe vertical **x**.

La roue plate fixe est matérialisée par une face dressée du bâti fixe.

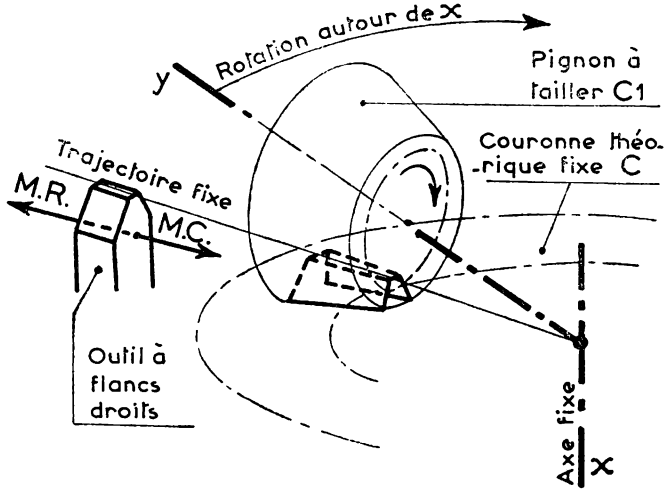


Fig:417- Principe de la génération sur machine "Reinecker"

Le support de l'arbre porte-pièce peut tourillonner dans un plan vertical pour donner l'inclinaison nécessaire au pignon. Le porte-tourillon tourne autour de l'axe vertical **x** par l'intermédiaire de la roue creuse qui le supporte. Le cône de roulement roule sans glisser sur la roue plate grâce à deux rubans métalliques attachés respectivement par une extrémité au cône et par l'autre au bâti, et transmet son double mouvement au pignon à tailler.

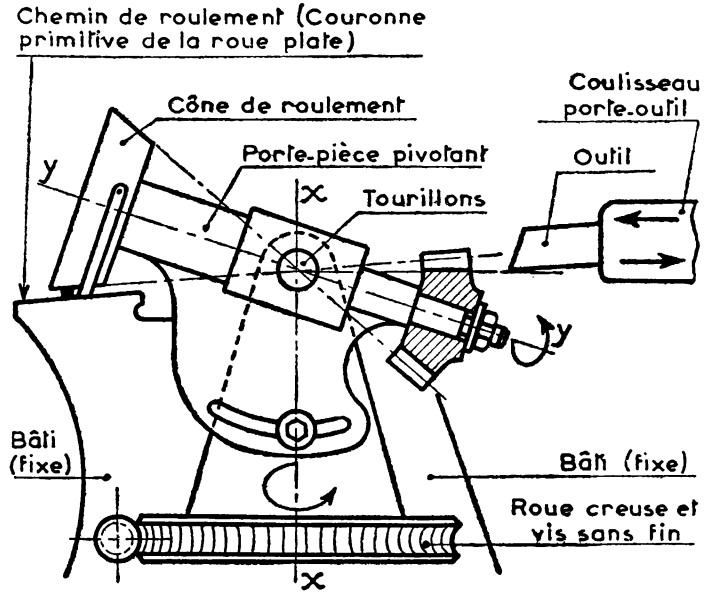


Fig:418- Schéma de la machine "Reinecker".

Extérieurement au cône et sur l'arbre porte-pièce est monté un diviseur commandé automatiquement, qui permet le taillage dent par dent.

Après ébauche à la fraise ou à l'outil à défoncer (fig. 419), l'outil de finition taille un flanc puis le flanc opposé ou tous les flancs d'un même côté, puis tous les autres flancs des côtés opposés.

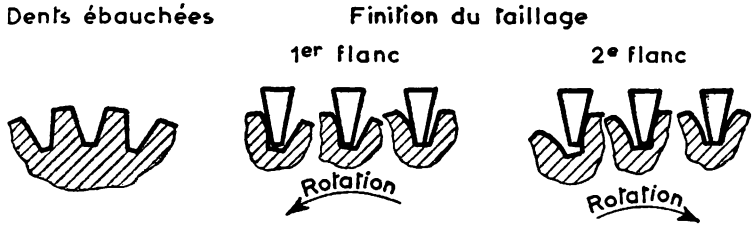


Fig:419- Phases du taillage sur machine "Reinecker"
Positions du pignon par rapport à l'outil.

D. PROCÉDÉ RÉVACYCLE (fig. 420).

C'est un taillage par brochage circulaire. Il n'y a pas de mouvement de génération : la pièce est fixe, l'outil a une avance parallèle à la génératrice du cône de pied de la pièce. Les dents successives de l'outil ont des profils croissants afin de former l'entredent dont le fond est à génératrices parallèles, donc de largeur constante, ce qui affecte la forme des dents.

Pour un tour de l'outil, on distingue :

— une période d'ébauche avec déplacement de l'outil de **O** en $\mathbf{O}_1$ et rotation de α_1 ;

— une période de demi-finition avec déplacement de l'outil de $\mathbf{O}_1$ en $\mathbf{O}_2$ et rotation de α_2 ;

— une période de finition avec déplacement de $\mathbf{O}_2$ en $\mathbf{O}_1$ et rotation de α_3. L'outil travaille donc en avalant, ce qui assure un excellent fini de surface ;

— une période sans travail, ou période de division, avec rotation de α_4. La pièce tourne d'une dent et l'outil retourne en **O**.

A chaque tour de l'outil, une dent est entièrement taillée.

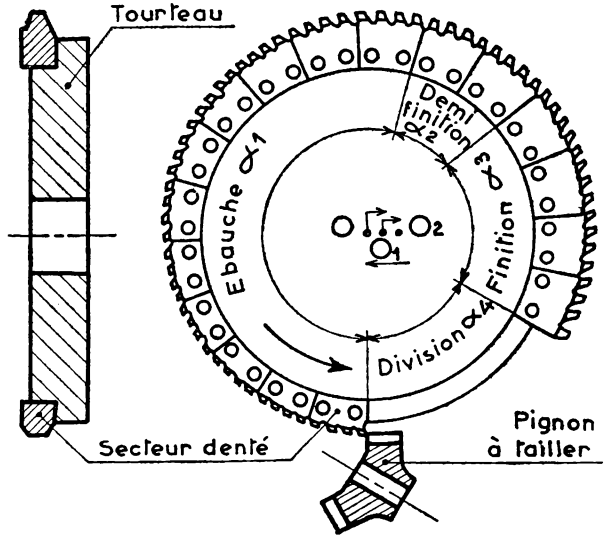


Fig. 420- Procédé "Revacycle".

Créé par Gleason, le procédé Révacycle est surtout appliqué au taillage en très grande série, satellites et planétaires de différentiels d'automobiles en particulier. La forme particulière des dents n'empêche nullement un bon fonctionnement du différentiel.

TAILLAGE DES DENTURES COURBES

La denture courbe pour roues et pignons coniques présente les mêmes avantages que la denture hélicoïdale pour roues cylindriques : marche plus silencieuse, plus souple en raison de la continuité des contacts au voisinage du primitif et répartition de l'effort tangentiel sur plusieurs dents.

Les dents de la roue plate, ou crémaillère conique, ont encore un profil rectiligne mais leurs génératrices sont en forme de spirale dont l'inclinaison radiale est mesurée par l'angle α (fig.421).

La taille peut être obtenue par outils couteaux (outils travaillant par rabotage), mais les machines actuelles taillent surtout par outils-fraises : fraise frontale ou vis-fraise conique et, dans tous les cas, par génération.

I. — TAILLE EN SPIRALE

A. TAILLAGE PAR FRAISE FRONTALE (fig. 421).

Un tourteau porte une rangée circulaire d'outils qui matérialisent une dent de la roue plate fictive et qui taillent un entre-dent du pignon ou de la couronne. Après taillage d'un entre-dent, la pièce tourne d'une dent par l'intermédiaire d'un diviseur automatique.

L'épure d'une dent de la roue plate (fig. 422) montre que le rayon de convexité est plus grand que le rayon de concavité (fig. 422). Donc, les arêtes coupantes des outils étant rectilignes (fig. 423), leur inclinaison n'est pas la même pour l'intérieur et pour l'extérieur des dents. Un outil sur deux taille l'intérieur et l'autre taille l'extérieur.

La figure 424 montre les positions relatives pièce-outil sur machine Gleason à fraise frontale.

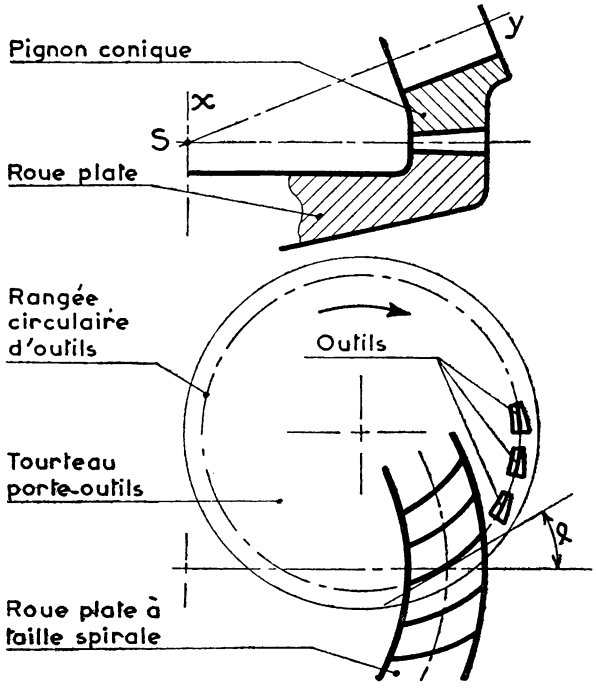


Fig: 421- Roue plate à taille spirale et fraise frontale à tourteau.

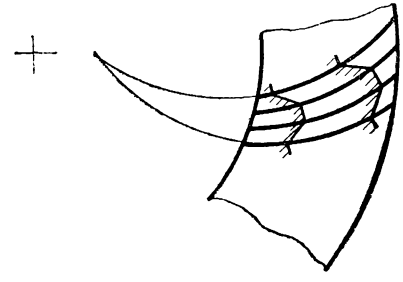


Fig:422- Détail d'une dent de la roue plate.

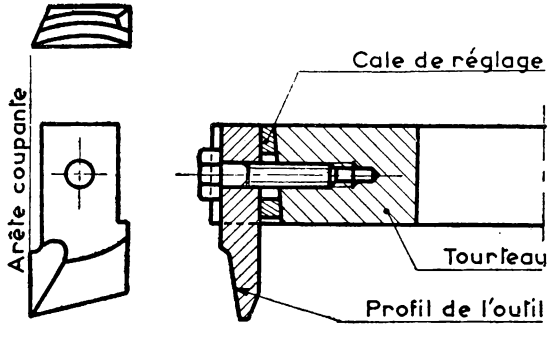


Fig: 423- Détails d'un outil.

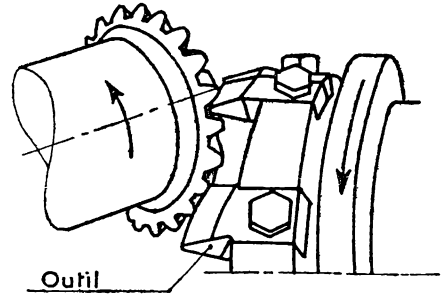


Fig:424- Positions relatives pièce-outil sur machine "Gleason"

La figure 425 est le schéma simplifié de réalisation de cette machine. Un outil **A** de la fraise trace dans l'espace une dent de la crémaillère conique fictive. La tête porte-outil peut coulisser verticalement (mouvement de réglage). Un berceau oscillant, qui matérialise la crémaillère conique fictive, a son axe de rotation concourant à celui de la pièce (1). La pièce tourne autour de son axe et ce mouvement est conjugué à celui d'oscillation du berceau (mouvements de génération).

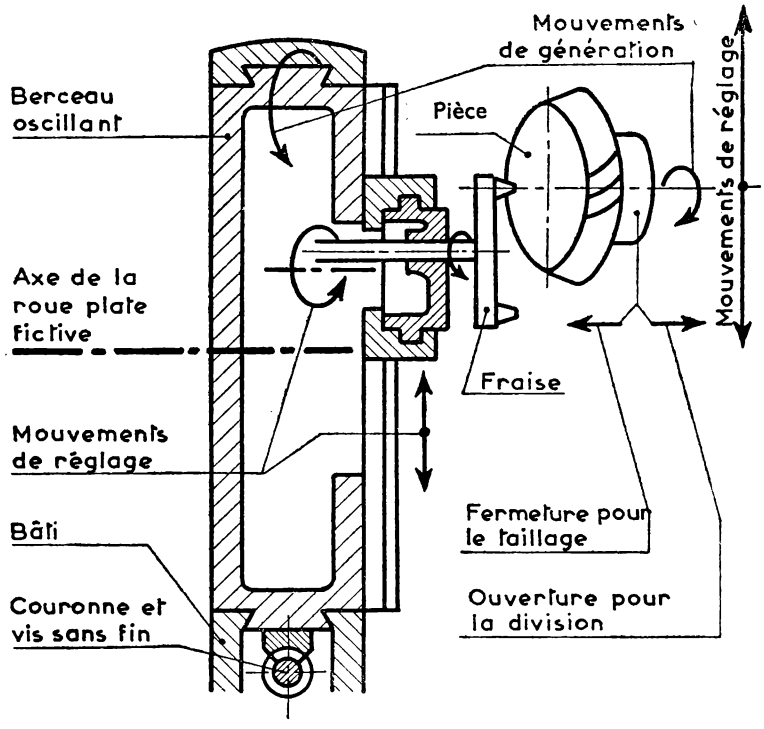


Fig:425- Schéma simplifié d'une machine "Gleason" à fraise frontale.

Lorsqu'une dent est taillée, la roue se dégage et tourne d'une dent, le mouvement de rotation de la roue et d'oscillation du berceau sont inversés, puis la roue se rapproche de l'outil et le cycle recommence.

La hauteur des dents est constante sur toute leur longueur et correspond à la hauteur du gros bout.

---

(1) La figure 425 représente la machine réglée pour une taille hypoïde. Le porte-pièce est un chariot monte et baisse. Pour la taille spirale, il faut amener l'axe du pignon à tailler dans le plan qui contient l'axe du berceau et qui est perpendiculaire au plan de figure, puis régler l'outil en hauteur.

B. TAILLAGE PAR VIS-FRAISE CONIQUE.

Les dents de la crémaillère fictive conique sont disposées suivant une développante de cercle (fig. 426).

La fraise (fig. 427) dont la taille est en hélice conique et à flancs droits matérialise les dents de la crémaillère fictive sur laquelle elle roule en tournant autour de son centre **O** (fig. 428). La génératrice **ab** de la fraise, au cours de son déplacement par rapport à la roue à tailler, commencera son attaque en $\mathbf{a_1b_1}$ et, s'enfonçant progressivement, terminera le taillage en $\mathbf{a_2b_2}$.

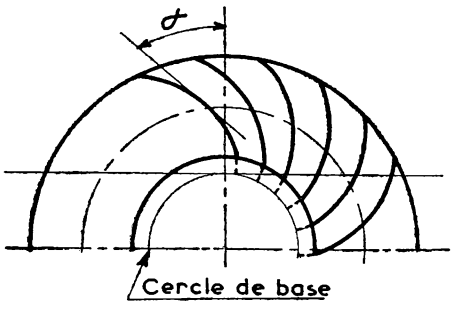


Fig: 426- Spirale en développante de cercle.

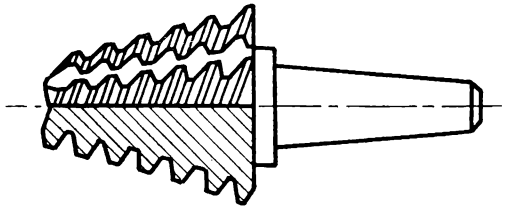


Fig: 427- Fraise conique

La figure 429 montre la pièce en début et en fin de taillage sur une machine Klingelnberg. La dent a même épaisseur sur toute sa longueur. De plus, elle est bombée du fait que la génératrice de la fraise est légèrement concave. Cette particularité a pour effet de localiser le contact des dents à leur partie médiane et de remédier à un léger mauvais positionnement des axes roue et pignon.

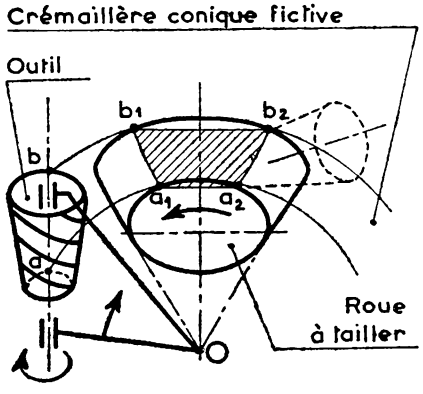


Fig: 428- Génération du taillage à la fraise conique.

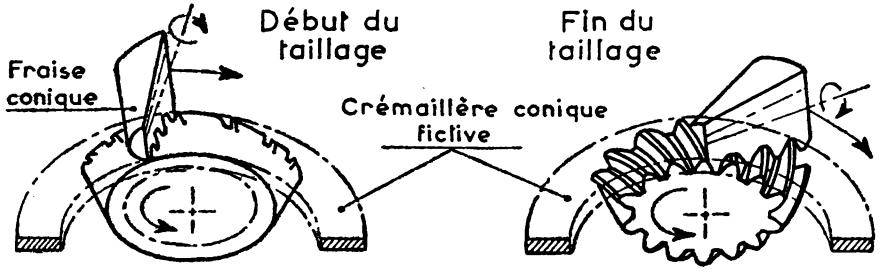


Fig: 429- Taillage à la fraise conique sur machine "Klingelnberg".

II. — TAILLE HYPOIDE

C'est une taille spirale particulière, qui permet l'engrènement lorsque les arbres ne sont pas concourants (fig. 430). Ses caractéristiques spéciales sont :

— **e** : excentration ;

— α : angle de décalage ;

— β : angle de la spirale de la couronne ;

— θ : angle de la spirale du pignon.

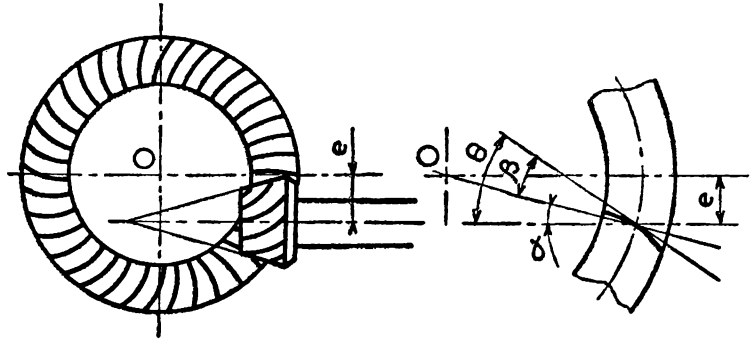


Fig:430- Couple hypoïde et angles de la courbe.

Le couple hypoïde est très utilisé comme transmission de mouvement du pont arrière des automobiles.

Toutes les machines à tailler en spirale peuvent exécuter la taille hypoïde (revoir la fig. 425 qui schématise une machine Gleason réglée pour taillage hypoïde).

Rectification des roues dentées

Pour accroître le rendement et la durée des roues dentées, il faut augmenter la précision dimensionnelle et la précision de forme des dentures, ce qui permet d'obtenir en outre une marche plus silencieuse et plus exempte de vibrations. On y arrive en pratiquant la rectification qui est d'ailleurs le seul moyen applicable lorsque les roues sont traitées thermiquement, ou le shaving (arasage) dans le cas contraire.

I. — RECTIFICATION PAR MEULE DE FORME

A. LA MEULE A LE PROFIL COMPLET DE L'ENTRE-DENT (fig. 431).

La meule est profilée par trois diamants montés sur un dispositif à pantographe. La machine communique :

— **à la meule,** le mouvement de coupe et le mouvement d'avance axiale;

— **à la pièce,** le mouvement de division.

La machine Minerva rectifie suivant ce procédé.

B. LA MEULE N'A QU'UN SEUL DES PROFILS DE L'ENTRE-DENT (fig. 432).

Le mouvement de pénétration de la meule n'est pas radial, mais résulte d'une rotation de la roue dentée autour de son axe. Après rectification de toutes les dents sur un flanc, on retourne la roue pour rectification des autres flancs. Ce procédé est appliqué sur la machine S.F.E.D.R.

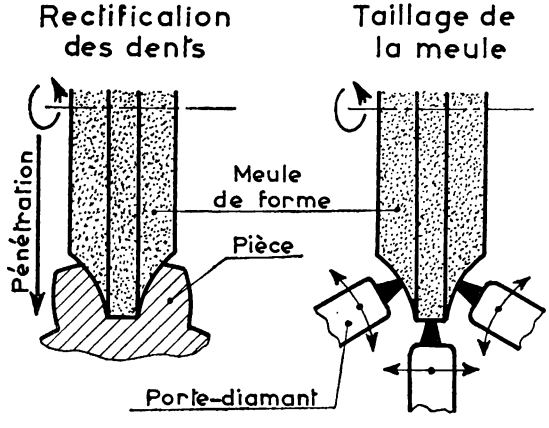


Fig. 431 – Rectification à la meule de forme à pénétration radiale.

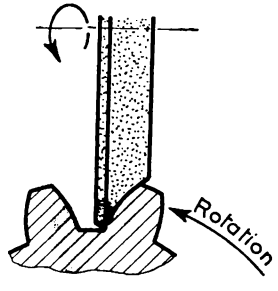


Fig. 432 – Rectification par meule de forme à pénétration oblique.

C. DEUX MEULES A UN SEUL PROFIL SONT COUPLÉES (fig. 433).

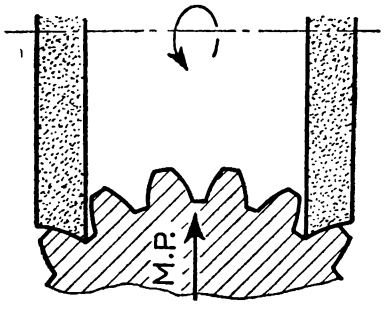


Fig:433- Rectification par meules de forme couplées à pénétration angulaire.

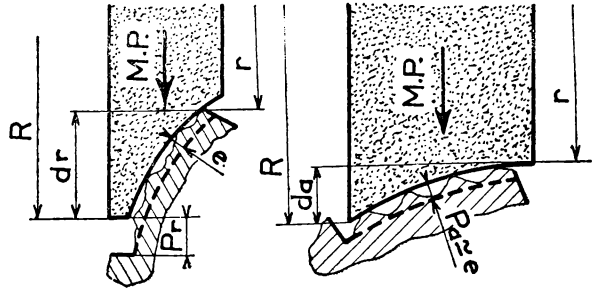


Fig:434- Comparaison du travail de rectification avec pénétration radiale ou pénétration angulaire.

C'est une variante du procédé précédent, qui présente l'avantage de rectifier simultanément deux flancs n'appartenant pas à la même dent et d'assurer une plus grande production.

La machine Zahnradwerke travaille suivant ce principe.

D. COMPARAISON DES PROCÉDÉS (fig 434).

Pour une même surépaisseur **e** à enlever, on constate :

1° que la pénétration radiale $\mathbf{P}_r$ est plus grande que la pénétration angulaire $\mathbf{P}_a$;

2° une différence $\mathbf{d}_r$ des rayons de la meule plus grande pour la pénétration radiale que la différence $\mathbf{d}_a$ relative à la pénétration angulaire à meules couplées. Il s'ensuit que, dans la pénétration radiale les vitesses de coupe sont très différentes, $\mathbf{V}_R > \mathbf{V}_r$, ce qui nuit au bon état de surface et crée une usure irrégulière du profil de la meule.

Pour améliorer ces mauvaises conditions de coupe, on utilise des meules de grand diamètre. La différence relative des vitesses de coupe est alors moins sensible car on a $\frac{\mathbf{V}_R - \mathbf{V}_r}{\mathbf{V}_R}$ d'autant plus petit que $\mathbf{V}_R$ est plus grand.

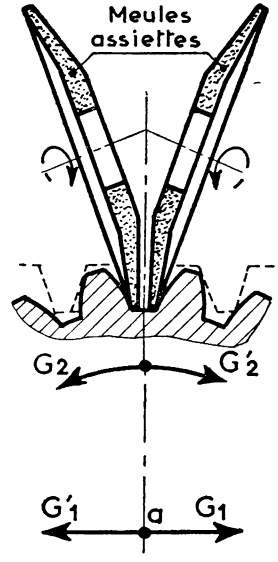


Fig:435 - Principe de la rectification par génération.

II. — RECTIFICATION PAR GÉNÉRATION

A. PRINCIPE (fig. 435).

Deux meules-assiettes matérialisent par leur plan de travail l'inclinaison des dents de la crémaillère. L'axe de la roue se déplace alternativement d'un mouvement rapide suivant $\mathbf{G}_1$ et $\mathbf{G}'_1$ et, en même temps, la roue oscille suivant $\mathbf{G}_2$ et $\mathbf{G}'_2$. Ces mouvements de génération sont

conjugués. Les meules se déplacent lentement suivant l'axe de la pièce pour travailler sur toute la longueur de la denture.

B. RÉALISATION DE PRINCIPE DE LA MACHINE (fig. 436).

La machine Maag qui utilise ce principe présente un chariot porte-pièce qui reçoit par came les mouvements $\mathbf{G}_1$ et $\mathbf{G}'_1$. Le cylindre de roulement de diamètre $\mathbf{D}_p$, grâce aux rubans d'acier qui l'entourent, roule sans glisser et imprime à la roue les mouvements $\mathbf{G}_2$ et $\mathbf{G}'_2$. L'ensemble se déplace suivant **M.A** pour l'avance de la pièce par rapport aux meules.

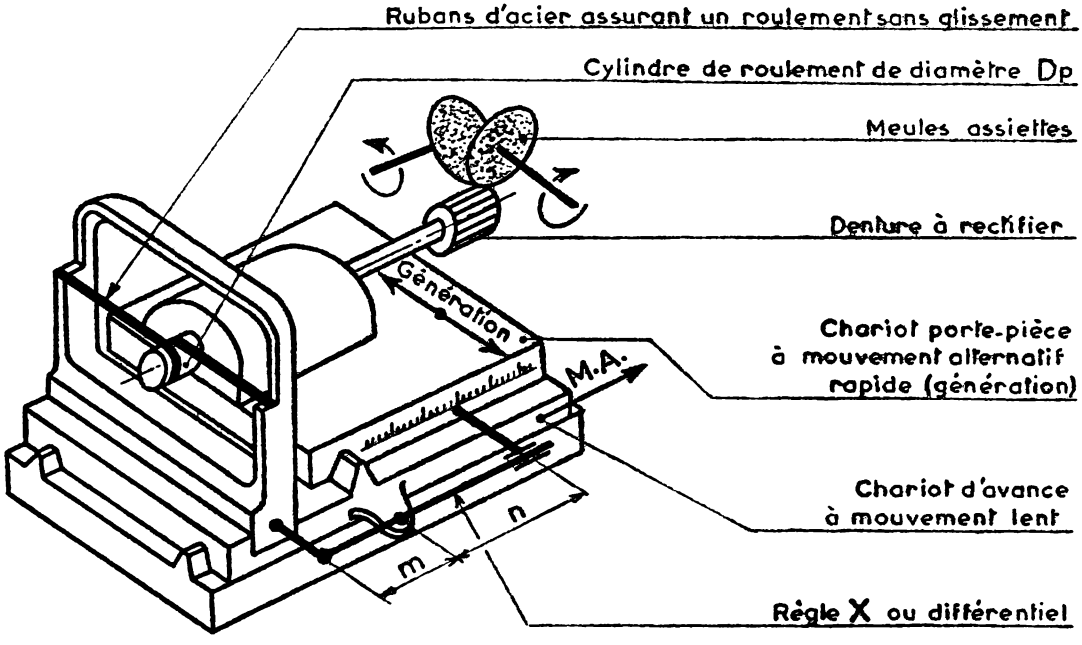


Fig: 436 – Machine "Maag" à deux meules assiettes

Si le cylindre de roulement a un diamètre $\mathbf{D}_p$ différent du diamètre $\mathbf{D}'_p$ de la roue à tailler, il est nécessaire de corriger le déplacement de translation de la roue par rapport aux meules. Un différentiel dit règle en **X**, porté par la machine permet cette correction. L'arcade porte-rubans peut alors glisser dans le chariot d'avance sous l'action d'un levier lié au chariot porte-pièce.

Supposons que $\mathbf{D}_p$ soit supérieur à $\mathbf{D}'_p$ (fig. 437). Pour la même rotation θ, le cylindre se déplace par rapport à l'arcade de $\frac{\theta \mathbf{D}_p}{2}$ et la roue ne doit se déplacer par rapport aux meules que de $\frac{\theta \mathbf{D}'_p}{2}$. Il faut donc que l'arcade glisse dans le bâti de $\frac{\theta \mathbf{D}_p}{2} - \frac{\theta \mathbf{D}'_p}{2} = \frac{\theta(\mathbf{D}_p - \mathbf{D}'_p)}{2}$.

Comme les mouvements $\frac{\theta D'_p}{2}$ de la roue et $\frac{\theta(D_p - D'_p)}{2}$ sont liés aux bras de levier **n** et **m**,

on a : $$\frac{\left(\frac{\theta D'_p}{2}\right)}{n} = \frac{\theta\left(\frac{D_p - D'_p}{2}\right)}{m}$$

d'où $$\frac{D_p}{D'_p} = 1 + \frac{m}{n}$$

Si le bras de levier **m** est connu, on peut régler **n** en faisant glisser son attache portée par le chariot porte-pièce de telle sorte que $n = m \frac{D'_p}{D'_p - D_p}$.

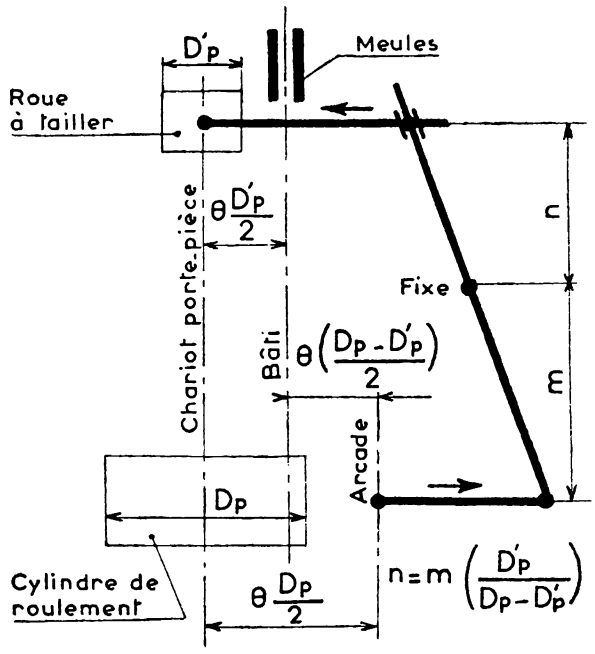


Fig: 437– Schéma fonctionnel de la règle en X

RECTIFICATION DES VIS SANS FIN

La figure 438 est le schéma de principe de la rectification par meule annulaire de grand diamètre. Après rectification d'un flanc, on retourne la vis et on procède à la rectification du flanc opposé.

Un autre procédé est illustré par la figure 439. La rectification est réalisée par meule boisseau conique, dont le plan de travail est tangent à l'hélicoïde développable contenant l'hélice de base.

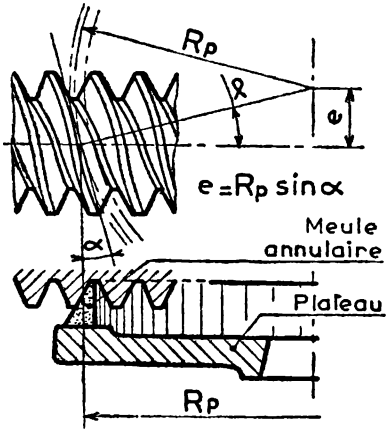


Fig: 438– Rectification de vis sans fin par meule annulaire.

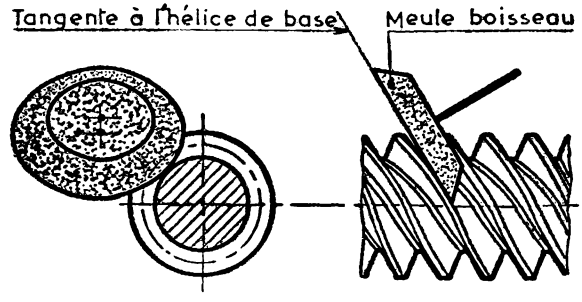


Fig: 439– Rectification de vis sans fin par meule boisseau conique.

Arasage des dentures au shaving

L'arasage à l'outil de coupe se substitue avantageusement à la rectification à la meule pour les engrenages utilisés sans traitement thermique. Il faut cependant noter que la trempe par induction donnant des déformations négligeables, on pourra l'appliquer à des roues et pignons arasés. Cette remarque explique l'importance croissante prise par l'arasage au détriment de la rectification.

I. — PRINCIPE DE L'ARASAGE (fig. 440).

Considérons la roue **O** à denture droite et la roue **O'** dont l'axe est oblique à celui de **O** et tous deux situés dans des plans parallèles **P** et **P'**.

Le profil **ab** de **O'**, au cours du roulement, ne s'appuiera pas suivant **mn** mais suivant **mn'**. Pour que l'engrènement soit possible, il faudra donner à la roue **O'** une **denture hélicoïdale gauche,** puisque les axes des deux roues ne sont pas parallèles. Il y aura glissement des points de contact par déplacement axial. Si **ab** est une arête coupante, il y aura grattage, ou plutôt râclage de la dent de la roue **O** par l'arête **ab.**

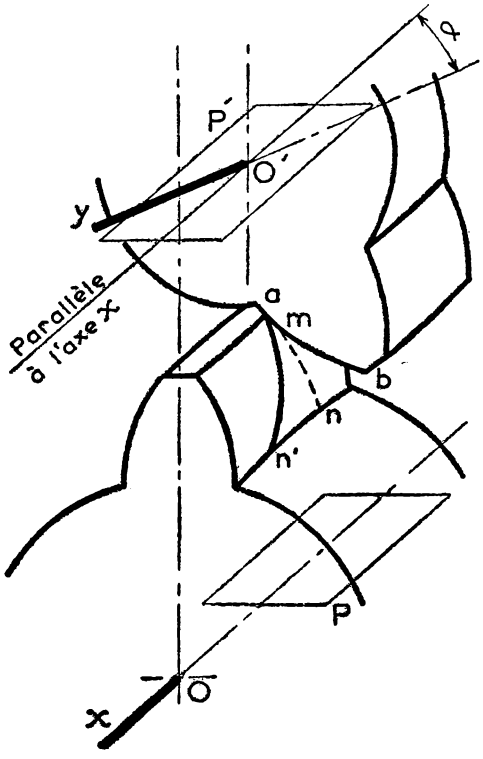


Fig:440- Principe de l'arasage et de la confection de l'outil.

Pour obtenir un nombre d'arêtes coupantes élevé, chaque dent de **O'**, qui est l'outil à araser, présente une suite de saignées équidistantes (fig. 431).

Si la roue a une taille hélicoïdale, l'outil est à taille droite.

II. — PRINCIPE DE RÉALISATION (fig. 442).

La pièce montée entre pointes est entraînée par l'outil. La pression de contact est donnée radialement à la pièce.

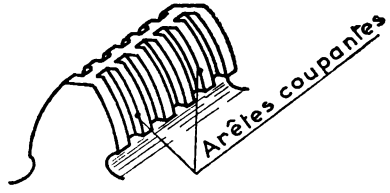


Fig:441- Taille d'une dent de couteau à araser.

Le point médian **P** (fig. 443) de la zone d'arasage est à l'intersection des plans axiaux. Pour araser la denture sur toute sa longueur, il faut déplacer la pièce axialement suivant $\mathbf{A}_p$: c'est l'arasage longitudinal. La figure montre de plus que pour éviter une usure localisée de l'outil, il faut déplacer la position du point **P** suivant $\mathbf{F}_o$.

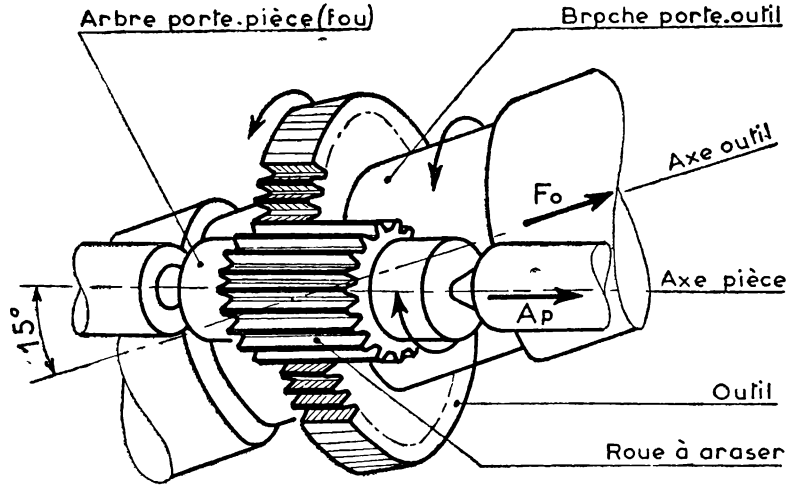


Fig:442- Arasage d'un pignon à denture droite.

L'outil tourne dans un sens puis dans un sens opposé pendant le retour et à chaque course la profondeur de passe est de quelques centièmes de millimètre.

L'arrosage doit être abondant. La vitesse de coupe est élevée, jusqu'à 200 *m/mn*, et l'avance lente, 10 *mm/mn* environ. La surépaisseur varie de 0,05 *mm* environ pour le module 1 à 0,4 *mm* pour le module 10.

Pour que l'arasage soit efficace, et pour éviter la reproduction périodique des défauts, le nombre de dents de l'outil et le nombre de dents de la pièce doivent être premiers entre eux. Ainsi toutes les dents auront même profil et le pas sera constant.

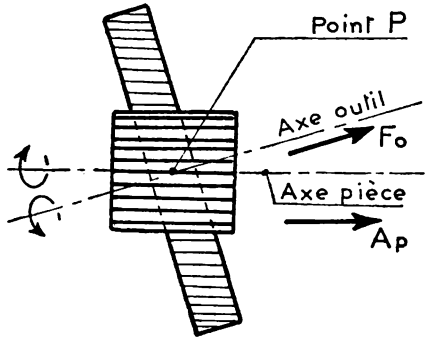


Fig:443- Arasage longitudinal.

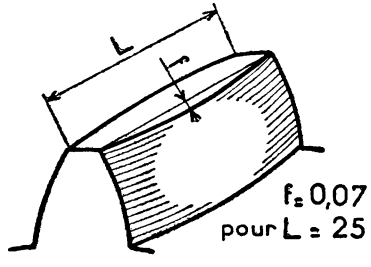


Fig:444- Denture bateau et localisation de la portée.

L'arasage présente le gros avantage de permettre la **denture bateau** (fig. 444). Cette denture bombée localise la portée dans la partie médiane de la dent, malgré un léger défaut de parallélisme des axes. Ainsi la dent présente la résistance maximale aux efforts qu'elle transmet.

La denture bateau est obtenue par oscillation du chariot porte-pièce pendant son déplacement (fig. 445).

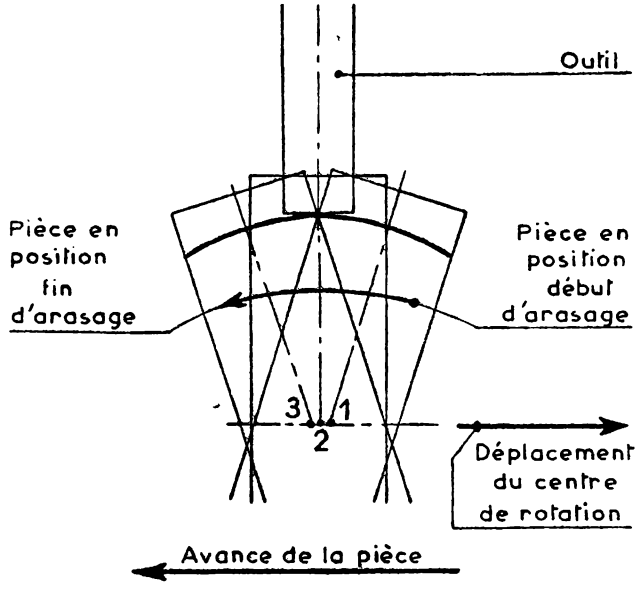


Fig. 445 - Principe de l'obtention de la denture bateau.

Rodage des dentures

Il n'existe pas de machines à rectifier et à araser les dentures coniques, mais la rectification des dentures spirales est possible.

Généralement, l'amélioration de l'état de surface des dents est obtenu par rodage. Les éléments sont appairés, l'un entraîne l'autre, et ils sont arrosés par un mélange liquide abrasif. L'audition du bruit à l'appareil à amplification électronique indique la marche de l'opération. Lorsqu'on juge l'engrenage suffisamment silencieux, le rodage est arrêté. Les pièces sont alors repérées dans leur position relative et seront placées dans cette même position au moment de leur montage définitif.

LES TRAVAUX D'ASSEMBLAGE

I. — GÉNÉRALITÉS

Tout appareil mécanique est constitué par des pièces assemblées les unes aux autres. Chaque pièce est parfois repérée par une marque, le plus souvent alphanumérique, frappée ou gravée. La liste de toutes les pièces constituant **l'ensemble de l'appareil** est la **nomenclature.**

Ex. : Nomenclature de toutes les pièces nécessaires au montage d'un étau-limeur.

L'ensemble est fractionné en plusieurs groupes de pièces, ou **sous-ensembles,** qui seront montés séparément. Chaque sous-ensemble présente des surfaces d'appui de référence assurant son positionnement précis par rapport au sous-ensemble voisin et sa liaison cinématique éventuelle,

Ex. : Coulisseau porte-outil, chariots porte-pièce, bielle et plateau manivelle, boîte de vitesses, dispositif d'avance, organes de graissage, bâti et moteur d'un étau-limeur.

C'est le bureau des études qui établit la nomenclature des pièces constitutives après avoir fixé pour chacune les conditions de fonctionnement : matière, cotes, tolérances et états de surface, mode de graissage, réglage des jeux, moyens de liaison. Certaines pièces sont fabriquées par l'usine, d'autres sont achetées chez des spécialistes ou de petits façonniers dits sous-traitants. Fabriquées ou achetées, elles sont entreposées au magasin dont les services, à l'aide des nomenclatures, peuvent vérifier si l'approvisionnement permet le montage complet de l'appareil.

II. — PLAN DE MONTAGE

Après avoir étudié les difficultés de montage et contrôlé qu'il n'existe aucune impossibilité, le bureau des méthodes dresse un plan qui prévoit successivement le montage des sous-ensembles et ensuite de l'ensemble de l'appareil.

A. MONTAGE DES SOUS-ENSEMBLES.

Il comporte généralement :

— le nettoyage des pièces ;

— l'ordre dans lequel elles sont montées ;

— le graissage à prévoir au montage ;

— l'outillage nécessaire (clés, tournevis, pinces, maillet...) ;

— les engins de levage pour la manutention dans le cas de pièces lourdes (grue d'applique, palan sur monorail...) ;

— le réglage des jeux de fonctionnement;

— un essai de fonctionnement.

Nous étudierons deux points particuliers :

1° Ordre du montage des pièces.

Soit le montage de la boîte de vitesses à train baladeur (fig. 446) pour étau-limeur. Il se fait dans l'ordre ci-après, étant supposé que les paliers ont été préalablement munis de leur douille en bronze.

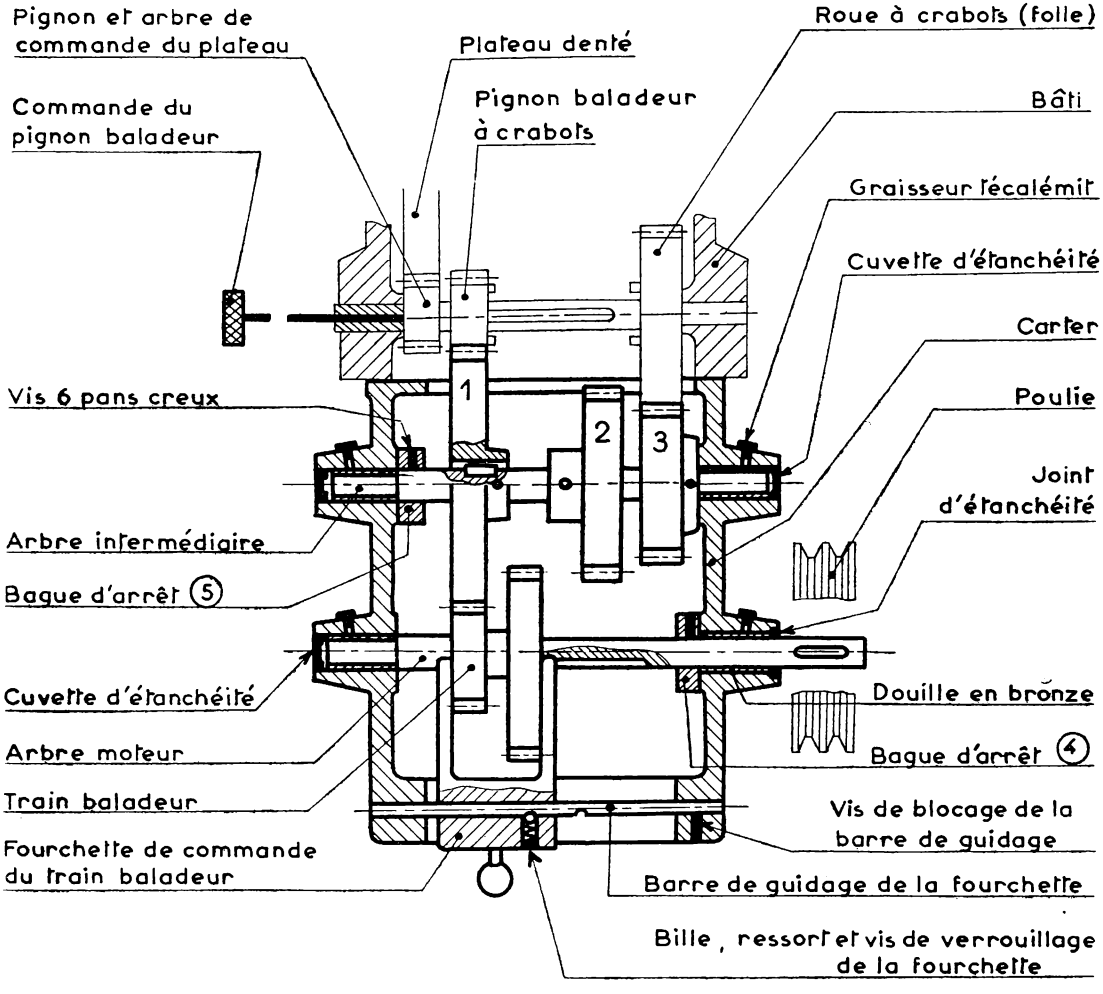


Fig: 446 - Ensemble de la boîte de vitesses joint au plan de montage.

a) Montage de l'arbre moteur (fig. 447).

— Engager l'arbre moteur dans le palier de droite;

— continuer l'engagement de l'arbre dans la bague d'arrêt [4], puis dans le train baladeur muni de sa clavette;

— bloquer la bague d'arrêt de façon que le collet de l'arbre soit appuyé contre le palier gauche.

La poulie réceptrice à gorges sera montée lorsque la boîte sera fixée au bâti afin de faciliter les manutentions.

b) Montage de l'arbre intermédiaire.

— Engager l'arbre dans le palier de droite;

— continuer son engagement dans le pignon [3], puis dans les pignons [2] et [1] et dans la bague d'arrêt [5];

— faire glisser les pignons, loger les clavettes à bouts ronds encastrées, amener les pignons à leur position et les goupiller;

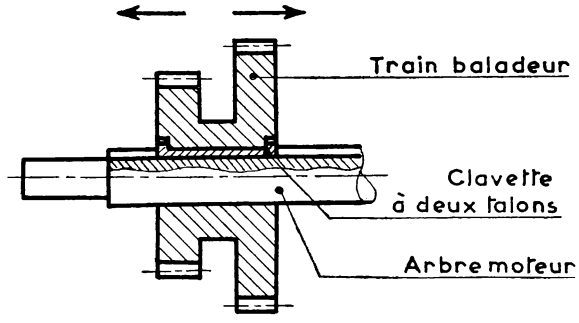


Fig:447- Clavetage coulissant.

— bloquer la bague [5], le pignon [3] étant appuyé contre le palier de droite.

c) Montage de la fourchette de commande du train baladeur.

— Loger la fourchette dans sa glissière de façon qu'elle embrasse le train baladeur;

— passer la barre de guidage dans le carter et dans la fourchette, puis monter le système de verrouillage à bille à ressort;

— bloquer la barre de guidage dans le carter de façon que, la fourchette verrouillée étant dans la position indiquée par le schéma, le petit pignon du train baladeur soit en regard du pignon [1].

d) Habillage de la boîte.

— Monter les graisseurs Técalémit et les cuvettes d'étanchéité.

Après fixation de la boîte au bâti, placer le joint d'étanchéité puis monter la poulie.

2° Réglage des jeux de fonctionnement.

Le réglage des jeux par cales réglables dites lardon (cas des chariots porte-outil ou porte-pièce des machines-outils) ne présente aucune difficulté particulière.

Lorsque les cales ne sont pas réglables, il faut les juxtaposer en les choisissant avec à-propos. C'est le cas, par exemple, du montage de la fusée d'une roue avant d'automobile sur son essieu (fig. 448).

Le jeu vertical doit être excessivement réduit (voisin de zéro) pour éviter sa rapide amplification due aux chocs et augmenter la sécurité du dispositif. La fabrication interchangeable

exigerait des tolérances très serrées qui la rendraient difficile et onéreuse et, d'autre part, l'usure inévitable conduirait au remplacement des pièces.

Grâce à la rondelle antifriction et aux deux rondelles intercalaires d'appoint d'épaisseurs variables à choisir au montage, on arrive au résultat suivant :

— tolérances de fabrication assez larges, donc prix de revient moins élevé;

— suppression du jeu vertical;

— retardement de l'usure grâce à la rondelle antifriction;

— possibilité de rattraper le jeu par remplacement des rondelles d'appoint.

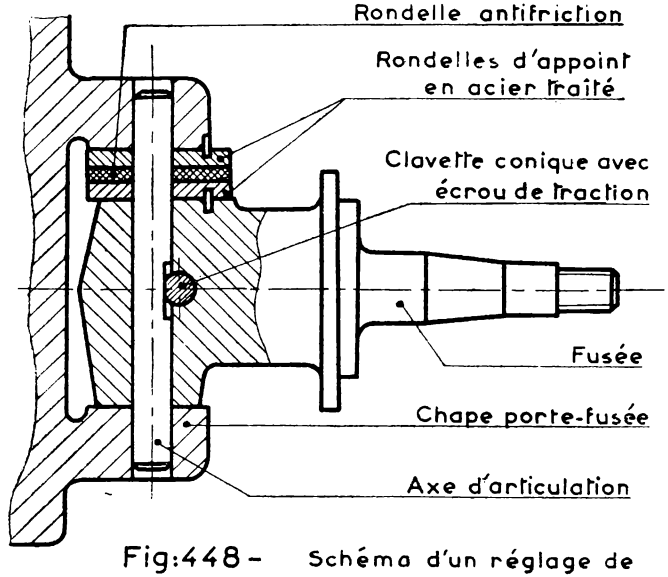


Fig:448 - Schéma d'un réglage de jeu par pièces d'appoint.

B. MONTAGE DE L'ENSEMBLE.

Les différents sous-ensembles sont généralement montés dans des ateliers contigus au hall de montage de l'ensemble où ils sont acheminés par manutention manuelle ou mécanique.

Le plan de montage prévoit :

1° L'ordre de montage des sous-ensembles et leurs modes de liaison.

Généralement, on commence par l'élément le plus important. Dans le cas d'un étau-limeur, par exemple, le montage suivrait l'ordre ci-après : arbre et pignons de commande du plateau manivelle et de liaison à la boîte de vitesses, plateau manivelle muni de son système de changement de course, bielle et sa liaison au bâti, coulisseau porte-outil et sa liaison à la bielle, pompe et canalisations de graissage, tête et chariot porte-outil, boîte de vitesses, traverse porte-table et son système de monte et baisse, table porte-pièce et système d'avance de la table, moteur.

Remarque. En règle générale, on ne fait aucune retouche par façonnage mécanique aux pièces au cours du montage. Cependant, dans quelques cas, on est conduit à faire des opérations de perçage simples.

Ainsi, le montage de la boîte de vitesses de l'étau-limeur nécessite une opération de perçage et d'alésage pour pieds de centrage assurant la position d'alignement avec les roues et pignons logés dans le bâti (fig. 449). A cet effet, les quatre trous de passage des vis de fixation laissent un jeu assez important au corps de la vis et les trous des pieds de centrage ont été préalablement percés, mais dans le carter seulement, à un diamètre — 0,1. Après positionnement de la boîte, on bloque les quatre vis, on perce les trous dans le bâti en utilisant ceux du carter comme guides et on alèse, la boîte étant toujours montée. On peut donc ensuite, après démontage, chasser les pieds de centrage, leur partie crénelée dans le bâti où ils resteront fixés, et remonter la boîte.

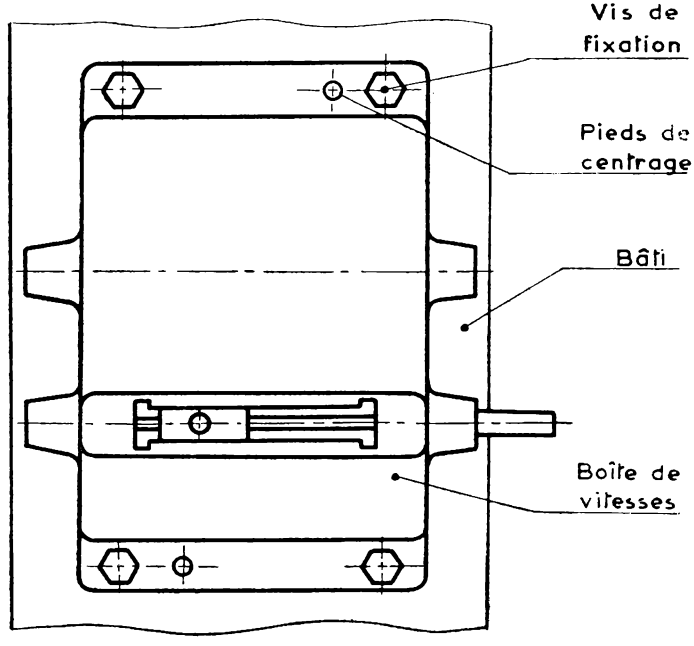


Fig:449 - Fixation de la boîte de vitesses.

2 Les vérifications ou essais et les opérations finales.

L'ensemble est ensuite vérifié ou essayé.

Ainsi, l'étau-limeur subira les vérifications géométriques prescrites par les normes Salmon par exemple, l'outillage de vérification et l'ordre des vérifications étant nettement spécifiés. Puis, acheminée par pont roulant et chariot mécanique, la machine est conduite à l'atelier de peinture. Après peinture, on posera les plaquettes indiquant les différentes vitesses et les grandeurs de course.

Dans le cas d'une automobile, la mise en route serait immédiate vers le banc d'essai moteur, la piste d'essais pour vérification de la tenue de route, de la conduite et du freinage.

MONTAGE A L'UNITÉ

Certaines industries travaillent à l'unité. Il en est ainsi pour la fabrication des grosses presses à emboutir ou des gros tours verticaux par exemple. La machine est alors montée sur plate-forme en usine, essayée, puis démontée pour rendre l'expédition possible ou plus facile.

Une équipe de monteurs remonte la machine chez le destinataire, à son emplacement définitif, et procède aux vérifications et aux essais. Le plan de montage et parfois aussi de démontage sont remis au client qui pourra ainsi procéder aux vérifications périodiques et à des réparations le cas échéant.

MONTAGE EN SÉRIE ET MANUTENTION DES PIÈCES

Lorsque la fabrication porte sur un assez grand nombre d'unités, le montage se fait en série. L'importance de l'appareil et la cadence de production journalière déterminent l'organisation du montage.

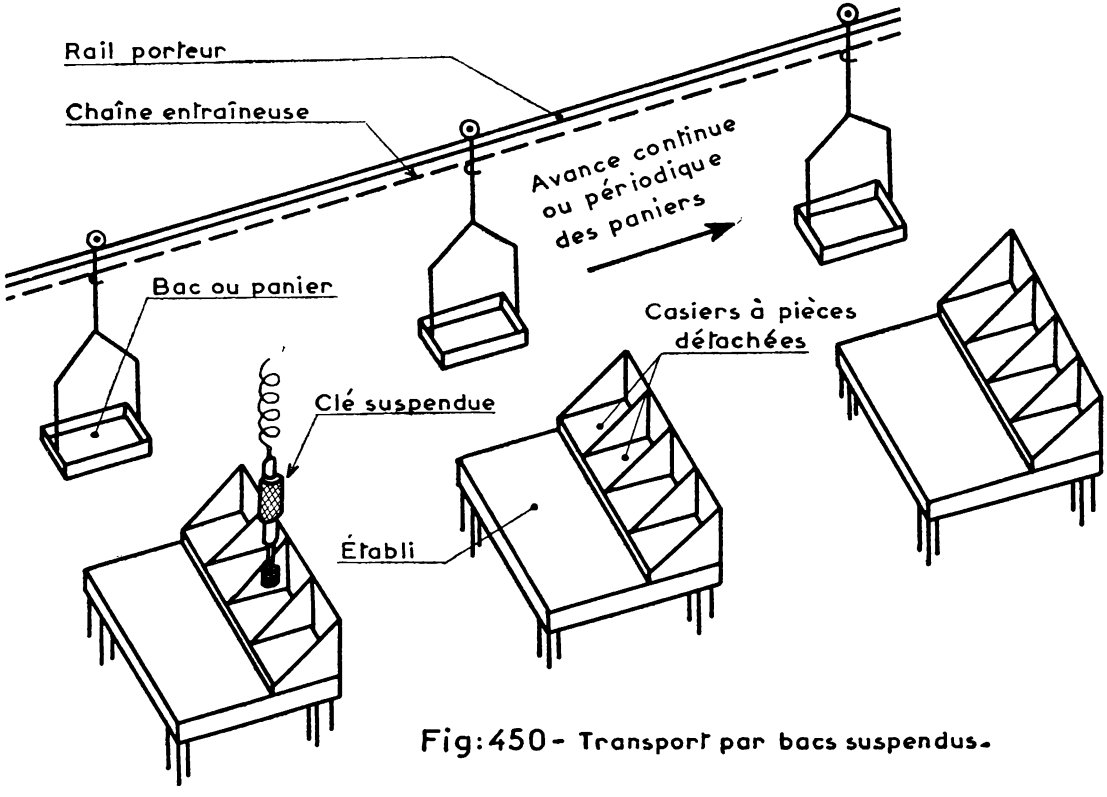


Fig:450- Transport par bacs suspendus.

I. — MONTAGE EN PETITE SÉRIE

Pour des petites séries, fabrication d'étaux-limeurs par exemple, les sous-ensembles sont montés à postes fixes sur établi puis distribués dans le hall de montage de l'ensemble.

Les bâtis sont disposés les uns à la suite des autres à l'aide d'un pont roulant et autour de chacun est placé l'assortiment nécessaire au montage. Les monteurs passent d'une machine à l'autre en effectuant chacun le montage du sous-ensemble et des accessoires dont il est spécialement chargé.

Les opérations de montage sont distribuées et complétées de façon que chaque tâche affectée à un opérateur demande le même temps total.

II. — MONTAGE EN GRANDE SÉRIE

Lorsque la fabrication porte sur un très grand nombre d'appareils ou sur une série illimitée (automobiles, machines à écrire, pendulettes par exemple) on pratique le **montage à la chaîne.**

Ce mode de montage consiste à déplacer les appareils devant l'équipe de monteurs. Chacun d'eux a une tâche à accomplir dans le même temps et toujours la même. Il faut donc que la répartition du travail soit étudiée à partir des gestes élémentaires accomplis par le monteur qui n'est d'ailleurs qu'un ouvrier spécialisé. On obtient ainsi, par la répétition continue, le maximum de précision et de rapidité dans le travail et les temps improductifs sont très réduits.

A. POSTE DE TRAVAIL FIXE

Pour un sous-ensemble ou un ensemble de petites dimensions et facilement maniable, l'opérateur est à poste fixe (fig. 450). Il est alimenté en pièces détachées mises dans des casiers disposés de telle sorte que la prise des pièces exige les gestes les plus courts possibles. Il dispose d'outils à commande électrique ou pneumatique (clés, tournevis) suspendus par des ressorts de faible tension et à portée directe de sa main.

Sa tâche terminée, le monteur place l'élément monté sur un tapis roulant ou dans des bacs suspendus entraînés par une chaîne sans fin se déplaçant horizontalement vers les postes suivants. Le déplacement du tapis ou des bacs peut être continu ou intermittent.

Pour éviter la fatigue de l'ouvrier et, par suite, un travail défectueux, on lui assure en principe une position assise. Parfois la forme de l'établi est adaptée aux gestes (fig. 451) pour réduire leur amplitude et le siège est tournant pour supprimer la torsion du corps.

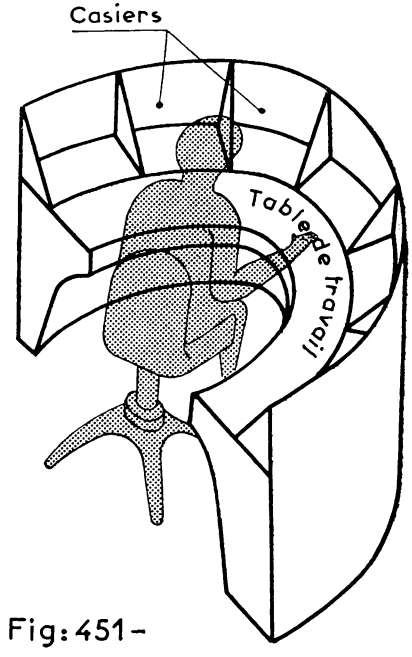


Fig: 451 - Etabli demi-circulaire

B. POSTE DE TRAVAIL MOBILE

Pour le montage des gros ensembles, les éléments de base sont accrochés à une chaîne sans fin horizontale

(fig. 452), constamment en mouvement à vitesse lente (environ, 100 *m/h*) dont la longueur peut atteindre 200 *m*. Les éléments sont distants les uns des autres d'une longueur variant avec le temps imparti à chaque montage partiel.

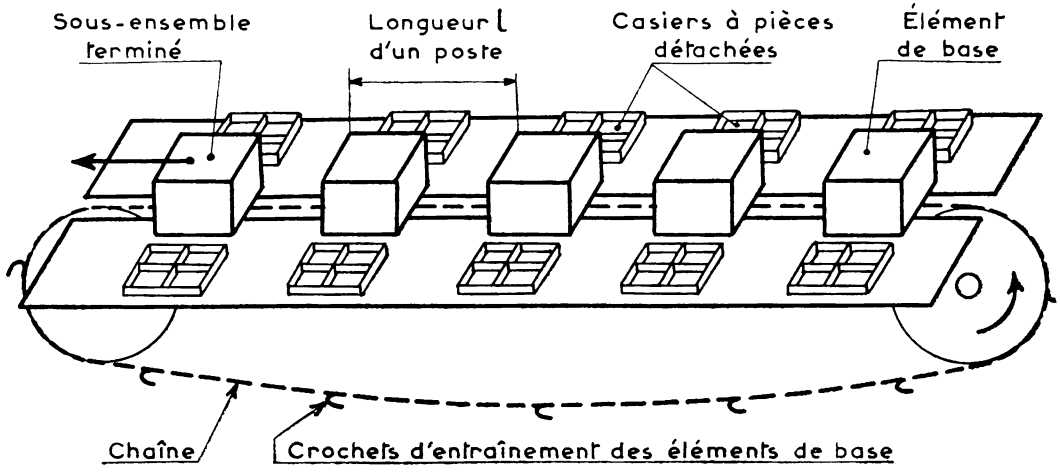


Fig: 452 - Schéma d'une chaîne de montage.

Pour un temps de 2 *mn* par exemple et une vitesse de 100 *m/h* la distance entre chaque élément, donc entre chaque poste de travail, est $\mathbf{l} = \frac{100}{60} \times 2$, soit environ 3,40 *m*. La chaîne transporte avec elle les casiers à pièces détachées placées dans l'ordre de montage.

Lorsque les monteurs ont terminé leur tâche, ils reviennent à leur point de départ où arrive le sous-ensemble suivant.

Cette méthode est plus productive que la précédente mais plus fatigante. On prévoit donc des marges de sécurité dans les temps calculés et on alloue 2 *mn* au maximum, par exemple, pour un temps effectif de 1 *mn* 50 *s*. Il n'y a ainsi aucune perturbation dans l'avance de la chaîne.

TRAVAUX DE DÉMONTAGE

Les réparations et les visites périodiques exigent presque toujours des démontages partiels. Pour éviter les pertes de temps et les difficultés de travail, il est bon d'établir un plan de démontage d'après le plan de montage qu'on a reçu du fabricant. Si certaines pièces doivent avoir des positions relatives invariables, il faut les repérer avant démontage pour éviter de nouveaux réglages. On procède ensuite à un nettoyage minutieux des différents organes, on change les pièces défectueuses si nécessaire et on remonte en suivant le plan de montage.

Si l'on ne dispose pas de pièces de rechange et si l'usure constatée n'empêche pas un fonctionnement un peu plus prolongé, on exécute le remontage, mais on fabrique ou on commande aussitôt les organes défectueux. On les met en place lors de la réparation définitive. Cette pratique, dite du double démontage, évite les arrêts prolongés des chaînes qui désorganisent parfois toute une fabrication.

USINABILITÉ, TEMPS DE COUPE ET ABAQUES

L'USINABILITÉ

I. — DÉFINITION

L'usinabilité d'un matériau est la propriété qui caractérise sa faculté de se laisser tailler par un outil de coupe. La meilleure usinabilité est celle qui correspond aux meilleures conditions d'économie de l'opération pour une qualité bien définie de la surface obtenue.

Entre deux métaux différents usinés dans les mêmes conditions de coupe, le plus usinable est celui qui permet le plus grand enlèvement de matière dans le temps le plus court, c'est-à-dire **celui qui permet le plus grand débit de l'outil.** Le plus usinable est aussi **celui qui demande le plus petit travail spécifique de coupe A_c exprimé en kg/m par cm³ de métal coupé.**

II. — FACTEURS D'USINABILITÉ

Les plus influents sont les propriétés mécaniques du métal à usiner. Cependant, la nature du matériau à outil, le profil de son arête coupante et les différents éléments de coupe influent aussi sur le travail spécifique de coupe, mais nous considérons leur action comme secondaire.

A. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Les propriétés mécaniques d'un métal dépendent des traitements thermiques qu'il a subis en raison des changements de structure qui en résultent.

N° de l'échantillon	Structure	$(Rr)_e$ kg/mm²	K kg.m/cm²	Travail spécifique de coupe kg.m/cm³	
				$\theta = 25°$	$\theta = 35°$
1	De surchauffe	60,5	2,6	183	155
2	De recuit	61,3	4,5	195	165
3	De trempe et revenu à haute température	61,7	9,8	237	190
4	De trempe et revenu à basse température	68,4	12	245	195

Tableau n° 7. — Travail spécifique de coupe en fonction de l'état structural d'un acier C 40 dans les conditions de coupe : V = 10 *m/mn*; avance 0,1 *mm*; outil en A.R.; $\theta = 25°$ et 35°.

1er exemple : Sur huit échantillons d'acier **C** 40 on a opéré quatre traitements thermiques différents à raison de deux échantillons pour chaque traitement, affectant très peu la valeur de la résistance à la rupture $(\mathbf{Rr})_e$ mais modifiant nettement la résilience **K**. L'usinage de quatre échantillons différents a été effectué avec un outil en **A.R** avec pente effective de coupe $\theta = 25^o$ alors que pour les quatre autres échantillons, la pente était de 35° (1).

Le tableau n° 7 consigne les résultats de ces essais. Leur comparaison (fig. 453 et 454) fait ressortir :

— que c'est surtout l'état structural qui a la plus grande influence sur le travail spécifique de coupe ;

— que la résistance à la rupture $(\mathbf{Rr})_e$ a peu d'influence sur ce travail et que cette influence ne suit pas une loi mathématique invariable ;

— que l'augmentation de la valeur de la pente effective de coupe augmente l'usinabilité puisque $\mathbf{A}_c$ diminue en passant de $\theta = 25^o$ à $\theta = 35^o$.

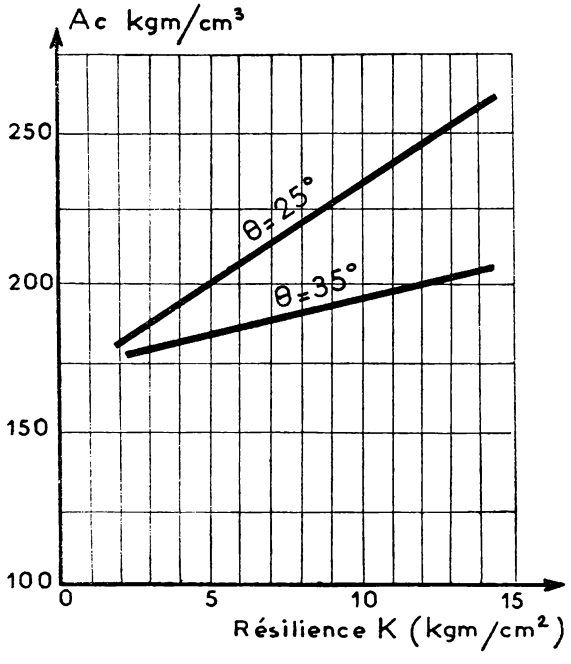


Fig: 453 - Valeur du travail spécifique de coupe Ac, en fonction de la résilience K, pour un acier C40.

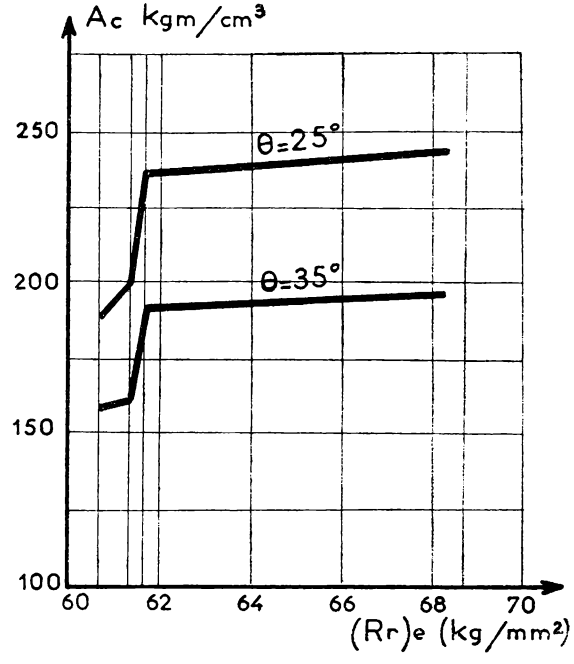


Fig: 454 - Valeur du travail spécifique de coupe Ac, en fonction de la charge de rupture (Rr)e, pour un acier C40.

2e Exemple : Un acier 15 N 20 cémenté et refroidi en caisse a une structure à martensite dure. L'usinage des réserves de cémentation d'un tel acier, dont la dureté Brinell est 285 HB provoque

(1) D'après les travaux de M. Eugène, ingénieur militaire principal de l'armement.

une usure anormale de l'outil. Après un recuit de 6 heures à 680° avec refroidissement lent, la martensite est détruite et la dureté passe à 310 HB. Malgré cette augmentation de la dureté, l'usinage s'effectue plus rapidement et la durée de l'outil est prolongée. Dans ce cas encore c'est la modification de la structure qui a modifié l'usinabilité, et d'autres expériences montreraient qu'il en est pratiquement toujours ainsi.

B. VITESSE DE COUPE

Le graphique figure 455 montre la variation du travail spécifique de coupe pour les aciers, en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance.

Pour une avance quelconque, le travail A_c est d'abord grand pour une faible vitesse de coupe puis décroit avec l'augmentation de la vitesse de coupe, puis croît de nouveau et enfin décroît constamment.

Pour un même acier usiné avec des avances difiérentes, les courbes A_c sont de même forme mais A_c diminue quand l'avance augmente.

La profondeur de passe était évidemment constante dans les deux cas.

Il résulte de ces expériences que :

1° Pour un travail d'ébauche, il y a intérêt à utiliser une forte avance car, pour une même puissance spécifique de coupe, le produit $a \times v$ augmente beaucoup plus par a que par v.

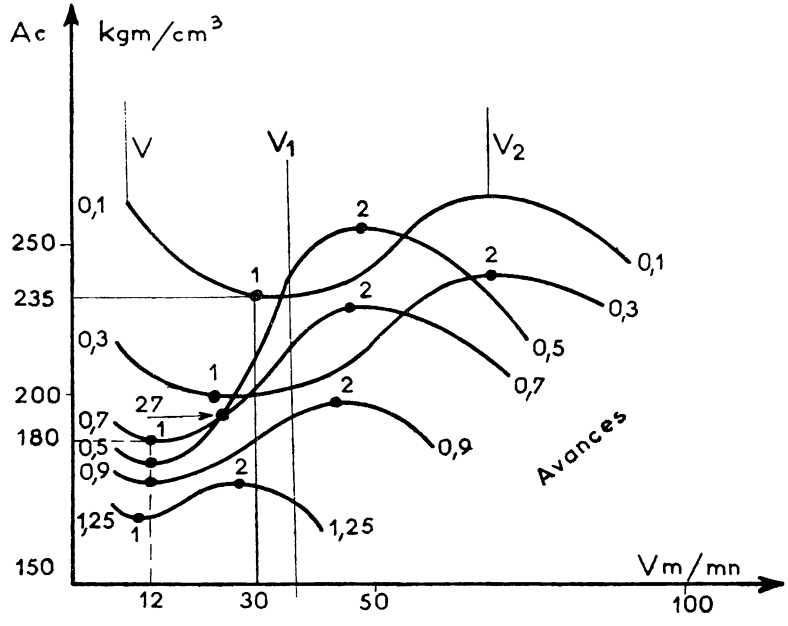


Fig: 455 – Variation du travail spécifique de coupe en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance. (Acier doux, outil AR, θ=25°)

Pour $\mathbf{A}_c = 20$ *kgm/cm*^{3}, par exemple, on peut avoir :

$\mathbf{a}_1 = 0{,}3$ et $\mathbf{v}_1 = 27$ dont le produit est 8,1
$\mathbf{a}_2 = 0{,}5$ et $\mathbf{v}_2 = 26$ dont le produit est 13
$\mathbf{a}_3 = 0{,}7$ et $\mathbf{v}_3 = 27$ dont le produit est 18,9
$\mathbf{a}_4 = 0{,}9$ et $\mathbf{v}_4 = 30$ dont le produit est 27

la dernière avance, soit 0,9, étant évidemment la plus économique.

2° Pour tenir compte, ce qui est essentiel, des possibilités de l'outil employé, il faudrait utiliser en même temps la loi du débit constant énoncée par le commandant Denis (1) et déterminer la profondeur de passe appropriée. Ainsi, pour une vitesse de coupe et une avance préalablement choisies et compte tenu du travail à réaliser, on retiendrait les éléments qui donneraient le travail spécifique de coupe le moins important.

Exemple de comparaison :

1er choix : $\mathbf{a}_1 = 0{,}3$ et $\mathbf{v}_1 = 30$ donnant $\mathbf{a}_1\mathbf{v}_1\mathbf{p}_1 = 9\ \mathbf{p}_1$ et $\mathbf{A}_c = 205$ *kgm/cm*^{3}.

2e choix : $\mathbf{a}_2 = 0{,}9$ et $\mathbf{v}_2 = 12$ donnant :

$$\mathbf{a}_2\mathbf{v}_2\mathbf{p}_2 = \mathbf{a}_2\mathbf{v}_2\mathbf{p}_1 \times \frac{\mathbf{a}_1^2\mathbf{v}_1^3}{\mathbf{a}_2^2\mathbf{v}_2^3} = \mathbf{a}_2\mathbf{v}_2\mathbf{p}_1 \times \frac{0{,}9^2 \times 12^3}{0{,}3^2 \times 30^3} = \mathbf{a}_2\mathbf{v}_2\mathbf{p}_1 \times 1{,}7 = 18{,}3\ \mathbf{p}_1$$

et $\mathbf{A}_c = 165$ *kgm/cm*^{3}.

Le 2e choix est le plus économique puisqu'il donne un volume de copeaux de 18,3 $\mathbf{p}_1$ (au lieu de $9\mathbf{p}_1$) et ne nécessite qu'une puissance spécifique de coupe de 165 *kgm/cm*^{3} (au lieu de 205 *kgm/cm*^{3}).

C. COPEAU ADHÉRENT

Les essais ont montré que le copeau adhérent, ou arête rapportée, qui se manifeste pour tous les métaux, gêne la coupe et, par suite, augmente le travail spécifique de coupe. Or, ce copeau est éliminé au-delà de la vitesse de coupe élevée $\mathbf{v}_2$ qui, sur le graphique figure 455, correspond au deuxième maximum du travail spécifique de coupe. Il y a donc intérêt, pour la finition et pour obtenir un meilleur état de surface, à éviter le copeau adhérent et, par suite, à réduire la section du copeau pour utiliser une vitesse de coupe élevée.

D. TRAVAIL SOUS LUBRIFICATION

L'arrosage empêche la formation du copeau adhérent et diminue le travail spécifique de coupe car le travail de frottement du copeau sur l'outil est nettement diminué.

CONCLUSIONS

Si l'on considère que le travail spécifique de coupe caractérise l'usinabilité, on peut dire :

— que l'usinabilité d'un matériau est surtout influencée par son état structural et qu'il y a intérêt à rechercher par un traitement thermique approprié une structure qui donne la plus faible résilience. On dit, dans ce cas, le plus faible **coefficient de décohésion.**

---

(1) Voir classe de Deuxième, page 206.

— qu'il faut, en travail d'ébauche surtout, se limiter à une vitesse de coupe qui donne un faible travail spécifique de coupe (fig. 455).

Pour déterminer l'usinabilité d'un matériau, il faut recourir à la méthode expérimentale et mesurer le travail spécifique de coupe dans chaque condition de travail envisagée.

A notre connaissance aucune documentation donnant des résultats utilisables n'a encore été établie.

TEMPS DE COUPE

Quelle que soit la méthode utilisée pour l'usinage d'une pièce, le temps d'usinage comporte toujours le **temps de coupe** ou **temps « copeau »**, ou **temps productif,** auquel s'ajoutent les temps morts ou improductifs afférents au montage de la pièce et de l'outil et à leur réglage, ainsi qu'à la mise en place du montage d'usinage le cas échéant et aux opérations annexes manuelles.

I. — CALCUL DU TEMPS DE COUPE

Le temps de coupe $\mathbf{T}_c$, que nous calculerons pour une passe seulement puisqu'il y a répétition, est fonction de :

— l'étendue de la surface à usiner ;

— la vitesse de coupe ;

— la grandeur de l'avance ;

— la machine utilisée (mouvement circulaire continu ou mouvement rectiligne alternatif).

A. TEMPS DE COUPE POUR LE MOUVEMENT CIRCULAIRE CONTINU

Soit à tourner la pièce (fig. 456).

La longueur de déplacement de l'outil **L** comprend la longueur de la partie usinée **l** plus la longueur **x** qui dépend de l'angle d'obliquité du profil de l'outil γ.

Pour une avance par minute **A** on a $\mathbf{T}_c = \dfrac{\mathbf{L}}{\mathbf{A}}$ avec $\mathbf{A} = \mathbf{N}$ tr/mn $\times$ **a** avance par tour, d'où $\mathbf{T}_c = \dfrac{\mathbf{L}}{\mathbf{aN}}$ (1).

Nous avons aussi $\mathbf{V} = \dfrac{\pi \mathbf{DN}}{1\,000}$ d'où on tire $\mathbf{N} = \dfrac{1\,000\,\mathbf{V}}{\pi \mathbf{D}}$ qui, reporté dans (1) nous permet d'écrire : $\mathbf{T}_c = \dfrac{\mathbf{L}}{\left(\dfrac{1\,000\,\mathbf{V}}{\pi \mathbf{D}}\right)\mathbf{a}} = \dfrac{\pi \mathbf{DL}}{1\,000\,\mathbf{Va}}$ (2)

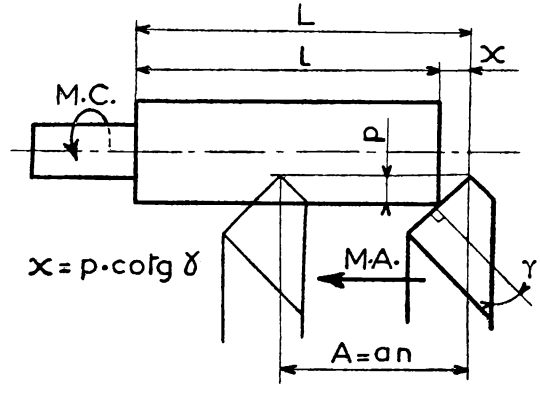


Fig: 456 – Facteurs du temps de coupe pour le tournage.

Exemple : Quel est le temps de coupe pour le tournage d'une pièce dans les conditions suivantes : $\varnothing = 85$ *mm*, $\mathbf{l} = 150$ *mm*; $\mathbf{a} = 0{,}6$ *mm*, $\mathbf{p} = 4$ *mm*, $\mathbf{V} = 32$ *m/mn* et $\gamma = 60^{o}$.

$\mathbf{x} = \mathbf{p} \times \text{cotg}\ \gamma = 4 \times 0{,}577 = 2{,}308\ mm \simeq 2\ mm.$

$\mathbf{L} = 150 + 2 = 152\ mm.$

$\mathbf{T}_c = \dfrac{3{,}14 \times 85 \times 152}{1\,000 \times 32 \times 0{,}6} = 2\ mn$ 6 s ou 0 h 035 ou 3,5 centièmes d'heure car on n'utilise pratiquement plus la numération sexagésimale.

Remarques. 1° La valeur de **x** est généralement peu importante pour le tournage et on peut la négliger lorsque **l** est grande.

2° La valeur $\mathbf{V} = \dfrac{\pi \mathbf{DN}}{1\,000}$ étant valable pour les outils tournants tels que fraise, meule, foret, la relation (2) est applicable au calcul du temps de coupe de perçage, de fraisage, de meulage.

Valeur de x pour le perçage (fig. 457)

On a $\mathbf{x} = \mathbf{r} \times \text{cotg}\ \gamma$. Si $2\gamma = 120^{o}$, cas du perçage de l'acier, pour un foret de 20 *mm* on aura :

$$\mathbf{x} = \mathbf{r} \times \text{cotg}\ 60^{o} = 10 \times 0{,}577 \simeq 6\ mm,$$

valeur qui ne doit pas être négligée.

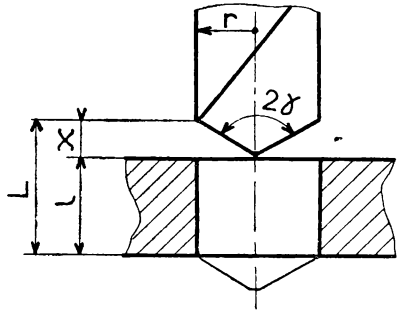


Fig:457 - Perçage:
$x = r \times \text{cotg}\ \gamma$

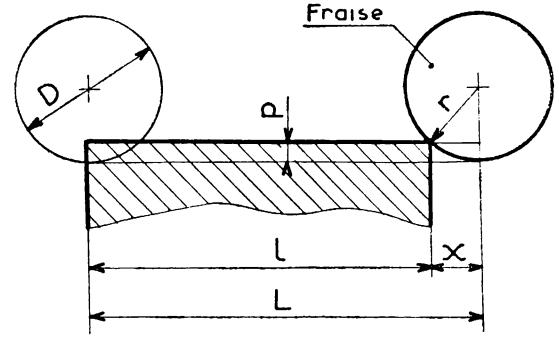


Fig:458 - Fraisage de profil:
$x = \sqrt{Dp - p^2}$

Valeur de x pour le fraisage

1° **Fraisage de profil** (fig. 458).

$$\mathbf{x}^2 = \mathbf{r}^2 - (\mathbf{r} - \mathbf{p})^2 = \mathbf{r}^2 - (\mathbf{r}^2 - 2\mathbf{rp} + \mathbf{p}^2) = \mathbf{r}^2 - \mathbf{r}^2 + 2\mathbf{rp} - \mathbf{p}^2$$
$$= 2\mathbf{rp} - \mathbf{p}^2 = \mathbf{Dp} - \mathbf{p}^2 \text{ et } \mathbf{x} = \sqrt{\mathbf{Dp} - \mathbf{p}^2} = \sqrt{\mathbf{p(D - p)}}$$

Pour une fraise de $\varnothing = 80$ *mm* et $\mathbf{p} = 5$ *mm*, on a $\mathbf{x} = \sqrt{5(80 - 5)} \simeq 19$ *mm*, valeur qui ne doit pas être négligée.

2° Fraisage de face.

a. L'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface fraisée (fig. 459-1).

Dans ce cas $\mathbf{x} = \mathbf{D}$, valeur importante dont il faut toujours tenir compte.

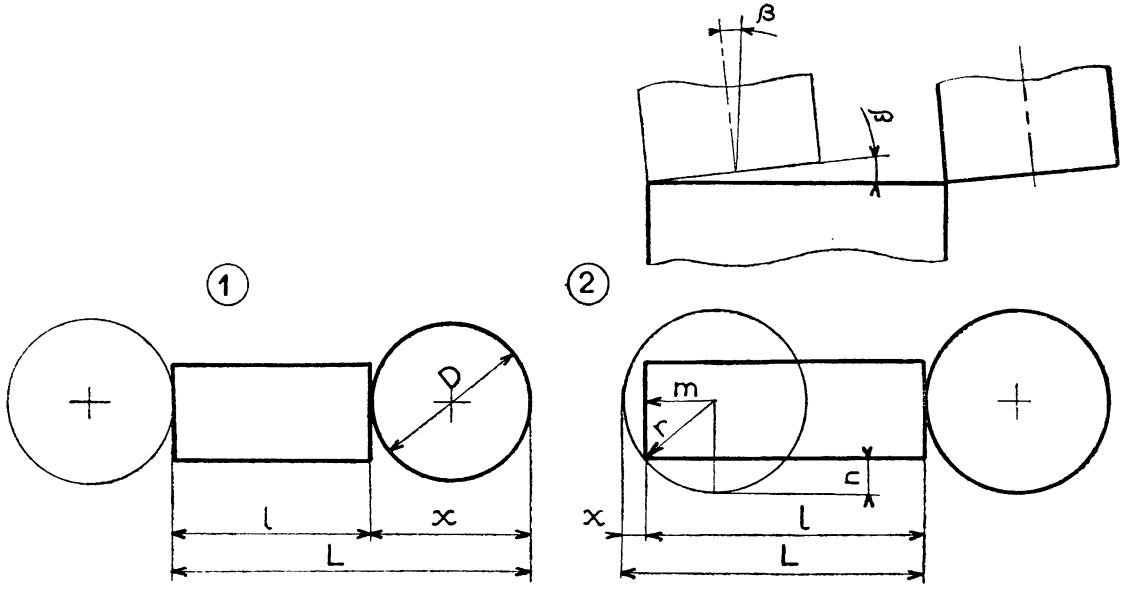


Fig:459- Fraisage de face

(1) L'axe de la fraise est normal à la surface fraisée : $x = D$

(2) L'axe de la fraise est oblique à la surface fraisée : $x = r - \sqrt{n(D-n)}$

b. L'axe de la fraise est incliné sur la surface fraisée (fig. 459-2).

Pour une fraise de grand diamètre et une inclinaison $\beta = 2'$, qui élimine le trait croisé, la planéité de la surface est encore acceptable et la longueur de sortie de la fraise est nettement diminuée : $\mathbf{x} = \mathbf{r} - \mathbf{m}$ avec $\mathbf{m} = \sqrt{\mathbf{Dn} - \mathbf{n}^2}$ soit $\mathbf{x} = \mathbf{r} - \sqrt{\mathbf{Dn} - \mathbf{n}^2} = \mathbf{r} - \sqrt{\mathbf{n}(\mathbf{D} - \mathbf{n})}$.

Pour une fraise tourteau de $\varnothing = 200$ *mm* et $\mathbf{n} = 5$ *mm* on a $\mathbf{x} = 100 - \sqrt{5(200 - 5)} \simeq 31$ *mm* au lieu de 200 si l'axe de la fraise était normal à la surface. La différence $200 - 31 = 169$ *mm* est donc très appréciable.

B. TEMPS DE COUPE POUR LE MOUVEMENT RECTILIGNE ALTERNATIF (fig. 460)

Un calcul analogue a celui qui a été fait pour le mouvement circulaire permet d'établir la relation :

$$\mathbf{T}_c = \frac{\mathbf{CL}(1 + \mathbf{r})}{1\,000\,\mathbf{Va}} \quad \text{avec :}$$

$\mathbf{C}$ = course de l'outil,

$\mathbf{r}$ = rapport du temps de retour de l'outil au temps de travail (ce qui revient à un parcours fictif réduit pendant la course retour).

La course $\mathbf{C}$ de l'outil comprend la longueur $\mathbf{m}$ à raboter augmentée des longueurs $\mathbf{n_1}$ et $\mathbf{n_2}$ nécessaires à la sortie et à l'attaque de l'outil.

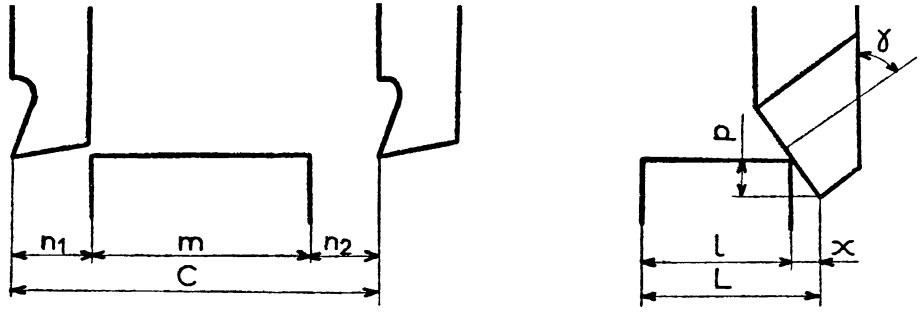


Fig: 460 - - Rabotage : $Tc = \frac{C\,L\,(1+R)}{1000\,Va}$; x = p.cotg. γ

Si, pour les petites courses, on admet $\mathbf{r} = 1$ on a :

$$\mathbf{T}_c = \frac{2\mathbf{CL}}{1\,000\,\mathbf{Va}}$$

II. — TEMPS D'USINAGE

A. TRAVAIL A L'UNITÉ

Au temps de coupe $\mathbf{T}_c$ il faut ajouter :

$\mathbf{T}_m$ = temps de montage de la pièce ;

$\mathbf{T}_r$ = temps de réglage de l'outil ou de la pièce ;

$\mathbf{T}_a$ = temps d'approche ;

$\mathbf{T}_d$ = temps de démontage de la pièce ;

$\mathbf{T}_n$ = temps de nettoyage du porte-pièce.

Soit un temps d'usinage pour une pièce :

$$\mathbf{T}_{u1} = \mathbf{T}_c + \mathbf{T}_m + \mathbf{T}_r + \mathbf{T}_a + \mathbf{T}_d + \mathbf{T}_n$$

B. TRAVAIL EN SÉRIE

Dans ce cas nous appellerons $\mathbf{T}_r$ le temps de mise en place du montage d'usinage qui évite les réglages.

Pour la 1re pièce, le temps d'usinage sera : $\mathbf{T}_{s1} = \mathbf{T}_{u1}$. Mais le temps $\mathbf{T}_r$ ne se renouvelant plus, pour la 2e pièce on aura : $\mathbf{T}_{s2} = \mathbf{T}_c + \mathbf{T}_m + \mathbf{T}_a + \mathbf{T}_d + \mathbf{T}_n + \frac{\mathbf{T}_r}{2}$. L'emploi du montage d'usinage va donc réduire considérablement le temps de réglage par pièce.

Pour $\mathbf{N}$ pièces le temps d'usinage sera :

$$\mathbf{T}_{s_N} = \mathbf{N}\left(\mathbf{T}_c + \mathbf{T}_m + \mathbf{T}_a + \mathbf{T}_d + \mathbf{T}_n + \frac{\mathbf{T}_r}{\mathbf{N}}\right)$$

D'autre part, si $\mathbf{T}_m$, $\mathbf{T}_a$, $\mathbf{T}_d$ et $\mathbf{T}_n$ sont compris pour une pièce dans le temps de coupe d'une autre pièce en utilisant des montages multiples comme dans le cas du fraisage en plateau circulaire (revoir fig. 77) on aura :

$\mathbf{T}_{s_N} = \mathbf{N}\left(\mathbf{T}_c + \frac{\mathbf{T}_r}{\mathbf{N}}\right)$ soit pour une pièce : $\mathbf{T}_{s1} = \mathbf{T}_c + \frac{\mathbf{T}_r}{\mathbf{N}}$. Enfin, lorsque $\mathbf{N}$ est très grand, $\mathbf{T}_r \simeq 0 = \mathbf{T}_{s1} = \mathbf{T}_c$.

En supposant que l'usinage d'une pièce comporte huit opérations, le temps total d'usinage sera la somme des huit temps de coupe correspondant à chacune des opérations.

C. TRAVAIL SUR MACHINE TRANSFERT

Sur machine transfert, toutes les opérations sont réalisées simultanément dans le temps de l'opération la plus longue $\mathbf{T}_o$. Pour une pièce, on aura donc : $\mathbf{T}_{t1} = \mathbf{T}_o$, temps réduit au maximum.

Il est bien entendu que l'usinage sur machine transfert ne peut être envisagé que si la production est continue et étalée sur un temps très long, jusqu'à quelques années, comme pour l'automobile par exemple.

LES ABAQUES ET LEUR UTILISATION

Les abaques sont des graphiques qui donnent sans calculs la résolution de relations et formules diverses. On détermine ainsi rapidement une variable inconnue qui est fonction de variables connues.

Nous ne traiterons pas de l'établissement des abaques mais seulement de leur utilisation.

I. — ABAQUES POUR DÉTERMINER LA VITESSE DE COUPE

A. POUR LE MOUVEMENT CIRCULAIRE CONTINU (fig. 461)

La relation fondamentale est : $\mathbf{V} = \frac{\pi \mathbf{DN}}{1\,000}$.

L'abaque utilisé (1) est un abaque à alignement (2). L'axe des nombres de tours-minute $\mathbf{N}$ et celui des diamètres $\mathbf{D}$ présentent deux échelles, ceci pour éviter un graphique trop encombrant ou peu lisible. Si l'on utilise les valeurs de gauche pour une échelle, il faut utiliser les valeurs de gauche pour l'autre échelle.

---

(1) Abaque établi par M. Plainevaux dans la revue « Mécanique-Électricité ».

(2) Nous avons donné, en classe de Deuxième, des abaques rayonnants (fig. 198), des abaques hyperboliques (fig. 199) et des abaques logarithmiques à coordonnées rectangulaires (fig. 200).

1er exemple : Pour $\mathbf{N} = 400$ *tr/mn* et $\mathbf{D} = 24$ *mm*, la droite qui joint 400 *tr/mn* à 24 *mm* coupe la droite **V** de la vitesse de coupe au point 30. On a $\mathbf{V} = 30$ *m/mn*.

2e exemple : Pour $\mathbf{N} = 40$ *tr/mn* et $\mathbf{D} = 65$ *mm*, la droite qui joint ces deux points coupe la ligne **V** au point 8. $\mathbf{V} = 8$ *m/mn*.

Remarques. 1° Les calculs donnent respectivement 30,14 *m/mn* et 8,16 *m/mn*. Mais les nombres lus sur l'abaque sont suffisamment précis dans la pratique.

2° On peut également déterminer **N** si l'on connaît **V** et **D**. De même la connaissance de **N** et **V** permet de déterminer **D**.

B. POUR LE MOUVEMENT ALTERNATIF (fig. 462)

La relation est $\mathbf{V} = \dfrac{\mathbf{CN}(1 + \mathbf{r})}{1\,000}$ ou $\mathbf{V} = \mathbf{V}'(1 + \mathbf{r})$ avec $\mathbf{V}' = \dfrac{\mathbf{CN}}{1\,000}$ car le rapport **r** étant variable, il faut d'abord rechercher la vitesse de coupe $\mathbf{V}'$ pour **N** battements/minute (*b/mn*) et une course **C** *mm*.

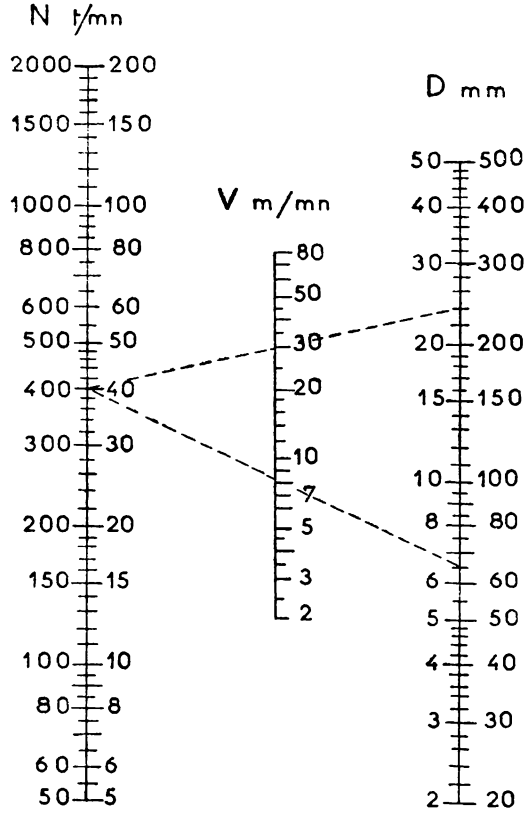


Fig: 461 - Abaque à alignement pour le mouvement circulaire.

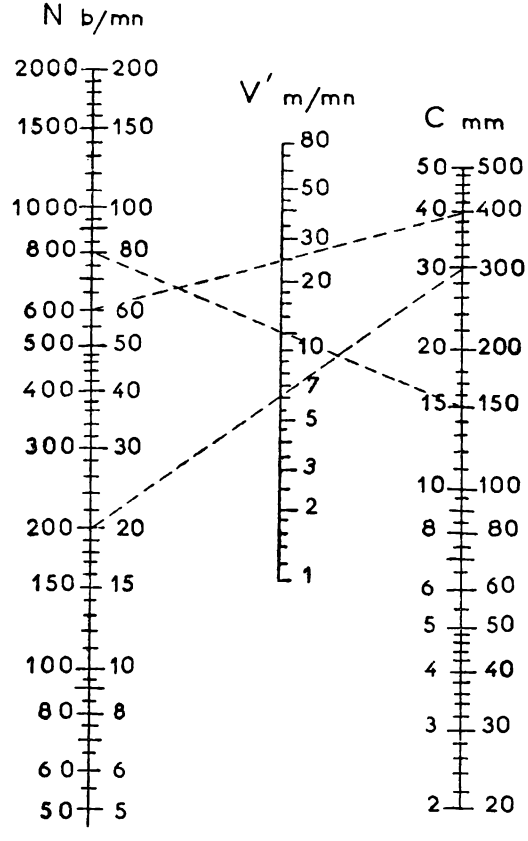
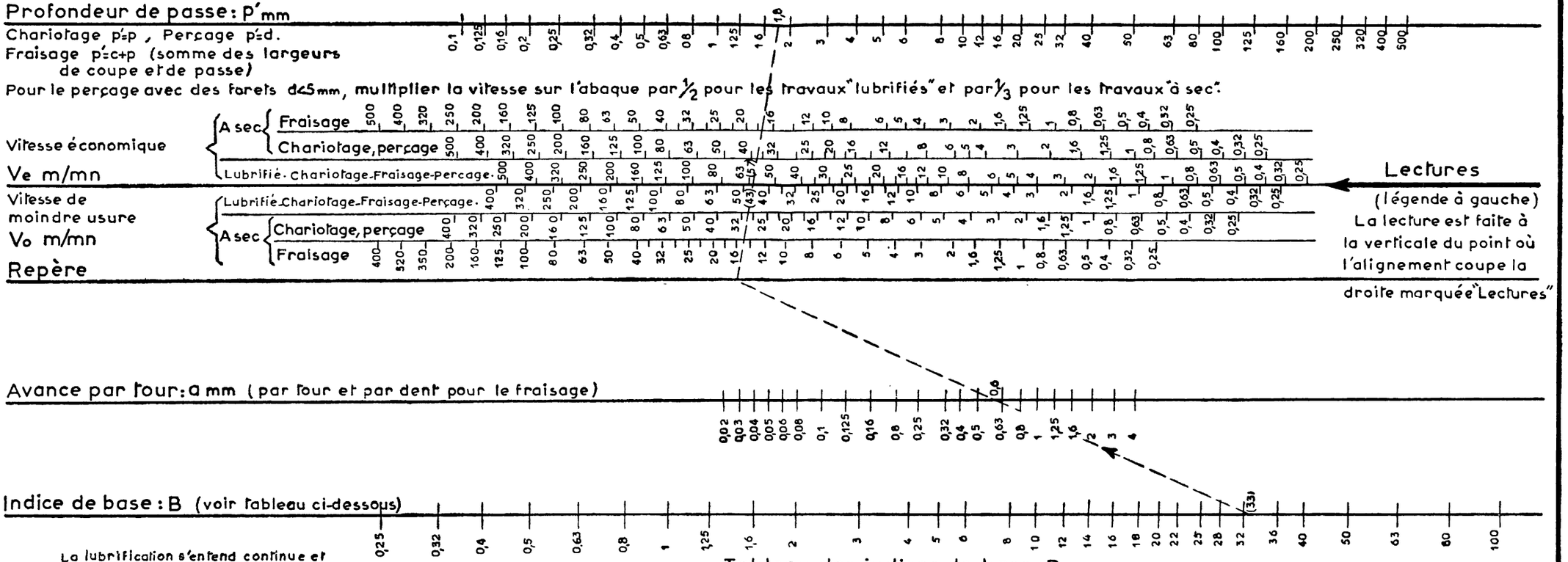


Fig: 462 - Abaque pour le mouvement rectiligne alternatif.

III CHARIOTAGE, FRAISAGE, PERÇAGE – Vitesses de coupe Vo et Ve –

D'après les travaux du Cdt DENIS –


Profondeur de passe: p' mm
Chariotage p'=p , Perçage p'=d.
Fraisage p'=c+p (somme des largeurs de coupe et de passe)
Pour le perçage avec des forets d<5mm, multiplier la vitesse sur l'abaque par 1/2 pour les travaux "lubrifiés" et par 1/3 pour les travaux "à sec".
Vitesse économique Ve m/mn
A sec
Fraisage
Chariotage, perçage
Lubrifié - Chariotage - Fraisage - Perçage
Vitesse de moindre usure Vo m/mn
Repère
Lectures
(légende à gauche)
La lecture est faite à la verticale du point où l'alignement coupe la droite marquée "Lectures"
Avance par tour: a mm (par tour et par dent pour le fraisage)
Indice de base: B (voir tableau ci-dessous)

La lubrification s'entend continue et abondante.

Les lectures se font par projection (ligne de rappel verticale), sur l'échelle intéressée, du point où l'alignement coupe l'échelle de base en trait fort marquée "Lectures".

La vitesse de moindre usure Vo est celle qui permet à l'outil de débiter le volume maximum de copeaux avant réaffûtage. Dans les mêmes conditions de travail, les vitesses de moindre usure Vo, les avances a et les profondeurs de passe p, assurant le même débit maximum sont liées par la relation :

$$a_1^2 p_1 V_{01}^3 = a_2^2 p_2 V_{02}^3$$

La vitesse économique Ve = 4/3 Vm est celle qui, compte-tenu des réaffûtages plus fréquents, permet d'effectuer le travail dans le minimum de temps – On ne l'adopte pas lorsque l'affûtage est trop onéreux (outils de forme)

Tableau des indices de base B

MODE DE TRAVAIL (Métal à usiner ↓ / Outil en acier →)	CHARIOTAGE au carbone et spécial	CHARIOTAGE rapide ordinaire	CHARIOTAGE rapide supérieur	FRAISAGE au carbone et spécial	FRAISAGE rapide ordinaire	FRAISAGE rapide supérieur	PERÇAGE au carbone et spécial	PERÇAGE rapide ordinaire	PERÇAGE rapide supérieur
Laiton	33	78	93	11,6	14	17,5	34	68	85
Bronze 90/10	28,5	67,5	81	11	12,8	16,3	27	52,5	64,5
Bronze 88/12	25,5	58,5	70,5	10,5	11,6	14,5	21,3	44	51
Bronze dur	22,5	51	61,5	10	11	13,4	17	35,5	40,8
Fonte grise et acier 30 kg	19,5	45	54	9,3	10	12,2	13,5	27	32,3
Acier 40 kg	16,5	39	46,5	8,2	8,7	11	10,2	18,5	23,8
Acier 50 kg	13,5	33	39	7,5	8,2	10,5	6,8	13	17
Acier 60 kg	10,5	27	33	7	7,5	9,3	4,3	9	12
Acier 70 kg	9	22,5	27	6,4	7	8,7	2,5	5,5	9,5
Acier 80 kg	6,8	18	21	5,8	6,4	7,5	0,9	3,5	6
Acier 90 kg	4,5	13,5	16,5	5,5	6,1	7		2,1	3
Acier 100 kg	3	9	12	5,2	5,8	6,4		0,9	1,7
Fonte aciérée	2,3	7,5	9,8	5	5,5	6,1		0,6	0,9
Acier 110 kg et au nickel à 25%	1,5	6	7,5	4,6	5,2	5,8		0,25	0,4

Fig: 463 – Abaque pour déterminer les vitesses de coupe corrigées Vo et Ve.

Ex. : 1° $\mathbf{C} = 400\ mm$, $\mathbf{N} = 60\ b/mn$ et $\mathbf{r} = 0{,}5$. La droite qui joint 400 *mm* à 60 *b/mn* coupe la droite $\mathbf{V}'$ au point 24. La vitesse réelle est : $24 \times (1 + 0{,}5) = 24 \times 1{,}5 = 36\ m/mn$.

2° $\mathbf{C} = 30\ mm$, $\mathbf{N} = 200\ b/mn$ et $\mathbf{r} = 1$. La droite qui relie ces deux valeurs indique $\mathbf{V}' = 6$. La vitesse réelle $\mathbf{V} = 6(1 + 1) = 12\ m/mn$.

3° Connaissant $\mathbf{V}$ et $\mathbf{C}$, quelle est la valeur de $\mathbf{N}$?

Dans ce cas, il faut d'abord diviser $\mathbf{V}$ par $1 + \mathbf{r}$ pour obtenir $\mathbf{V}'$ puis joindre les valeurs $\mathbf{C}$ et $\mathbf{V}'$ et prolonger pour lire $\mathbf{N}$.

Si $\mathbf{V} = 18\ m/mn$, $\mathbf{C} = 150\ mm$ et $\mathbf{r} = 0{,}5$ on a $\mathbf{V}' = \dfrac{1 + 0{,}5}{18} = 12\ m/mn$. La droite prolongée joignant 150 *mm* à 12 *m/mn* indique $\mathbf{N} = 80\ b/mn$.

C. ABAQUE POUR DÉTERMINER LES VITESSES DE COUPE CORRIGÉES $\mathbf{V}_o$ et $\mathbf{V}_e$ EN FONCTION DE TOUS LES ÉLÉMENTS EN JEU

De nombreuses études ont été faites dans ce sens et on trouvera dans les ouvrages spécialisés ou dans les revues techniques des exemples très divers d'abaques donnant la vitesse de coupe à utiliser d'après certains éléments connus comme : matière à usiner, caractéristiques de l'outil, lubrifiant de coupe, durée de l'outil, puissance absorbée par la coupe, dimensions du copeau...

Nous nous limiterons à une traduction sous forme d'abaques à points alignés des documents établis par le commandant Denis.

On sait que la vitesse de coupe de base $\mathbf{V}_o$ doit être corrigée en appliquant la loi du débit constant $= \mathbf{a}^2\mathbf{p}\mathbf{V}^3 =$ constante et que le tableau du commandant Denis tient compte d'un arrosage abondant et des conditions types suivantes :

Chariotage : $\mathbf{p} = 5\ mm$, $\mathbf{a} = 0{,}5\ mm$.

Fraisage : longueur de passe + profondeur de passe = 50 *mm* avance par tour et par dent : 0,05 *mm*.

Perçage : diamètre du foret 25 *mm*, avance par tour 0,25 *mm*.

A partir de ces données, l'abaque (fig. 463) (1) donne sous une forme condensée la possibilité de déterminer la vitesse de coupe de moindre usure $\mathbf{V}_o$ ou la vitesse économique $\mathbf{V}_e$ pour les machines-outils courantes.

Ex. : Chariotage d'un acier mi-dur, charge de rupture environ 60 kg/mm^2 avec un outil en acier rapide supérieur, profondeur de passe $\mathbf{p} = \mathbf{p}' = 1{,}8\ mm$, avance par tour $\mathbf{a} = 0{,}6\ mm$, lubrification abondante.

L'indice de base B (tableau) est 33, c'est le point de départ de l'alignement qui passera par $\mathbf{a}' = 0{,}6$ jusqu'à la ligne repère et viendra ensuite se fermer sur $\mathbf{p}' = 1{,}8$. La lecture faite à la verticale du point intercepté sur la ligne « Lectures » donne les éléments suivants :

1° **Chariotage ou perçage ou fraisage avec lubrification :**

$$\mathbf{V}_o = 43\ m/mn\ ;\quad \mathbf{V}_e = 57\ m/mn$$

---

(1) Voir l'ouvrage « Organisation industrielle » par A. Castell.

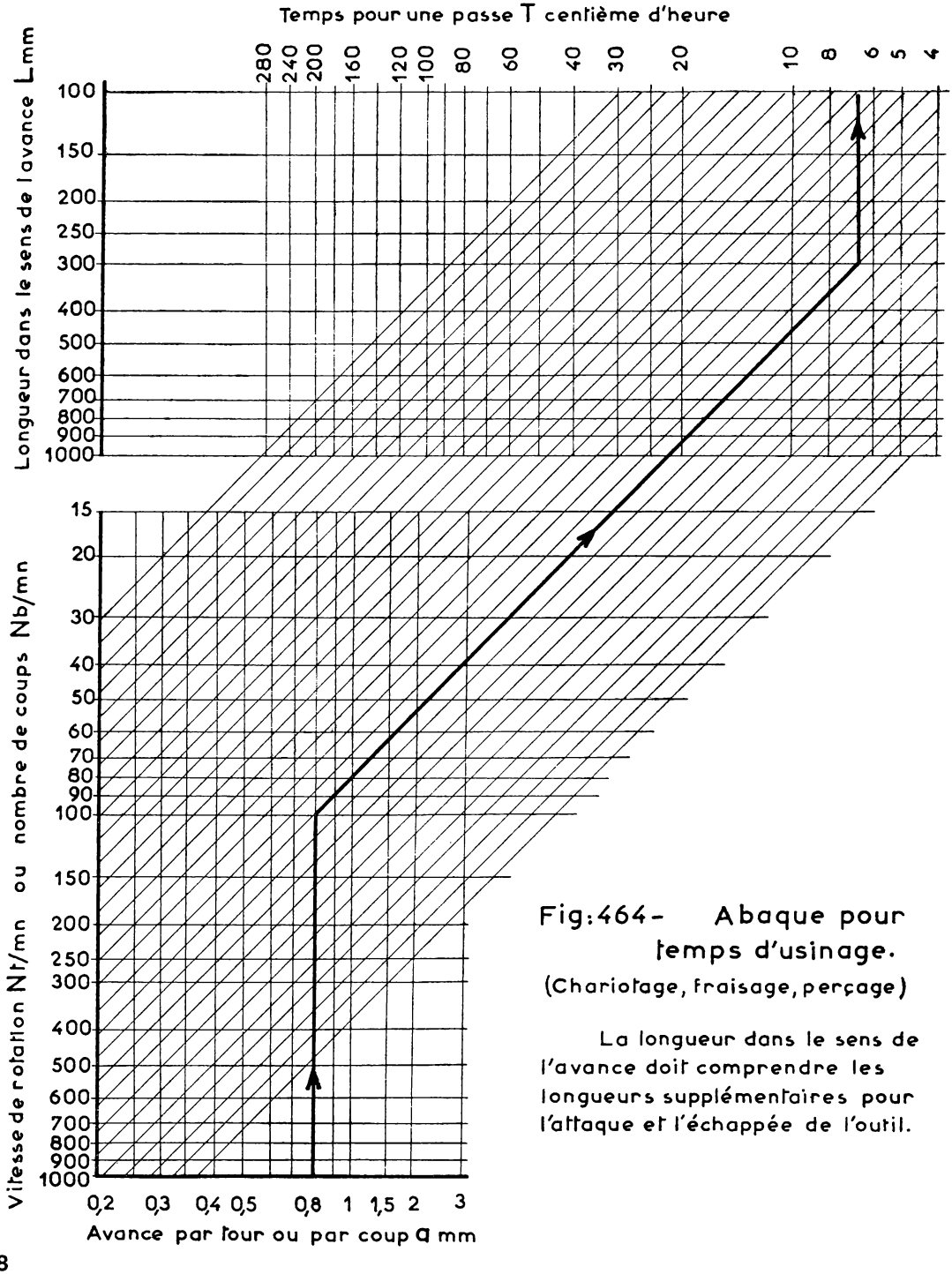


Fig:464- Abaque pour temps d'usinage.

(Chariotage, fraisage, perçage)

La longueur dans le sens de l'avance doit comprendre les longueurs supplémentaires pour l'attaque et l'échappée de l'outil.

2° **Chariotage au perçage à sec :**

$$\mathbf{V}_o = 28 \ m/mn ; \quad \mathbf{V}_e = 38 \ m/mn$$

3° **Fraisage à sec :**

$$\mathbf{V}_o = 13 \ m/mn ; \quad \mathbf{V}_e = 17 \ m/mn$$

On pourrait aussi, en partant de la vitesse de coupe désirée, déterminer l'élément inconnu, avance, profondeur de passe ou outil, en alignant en conséquence.

II. — ABAQUE POUR DÉTERMINER LE TEMPS DE COUPE (fig. 464).

Pour l'emploi de cet abaque, il faut déterminer la longueur totale **L** dans le sens de l'avance en tenant compte des longueurs partielles nécessaires à l'attaque et à l'échappée de l'outil, principalement pour le fraisage et le perçage, comme nous l'avons signalé au paragraphe **« Temps de coupe »**.

Ex. : Soit une opération de tournage sur une longueur de 300 *mm* avec une avance de 0,8 *mm* et une vitesse de rotation de 100 *tr/mn*. Quel sera le temps de tournage?

Suivre l'abscisse $\mathbf{a} = 0{,}8$ jusqu'à l'ordonnée $\mathbf{N} = 100$ *tr/mn* puis obliquer jusqu'à l'ordonnée $\mathbf{L} = 300$ *mm* et enfin remonter vers l'abscise de **T** où on lit $\frac{7}{100}$ d'heure (soit $7 \times \frac{60}{100} = 4{,}2$ *mn* ou 4 *mn* 24 *s*).

PRINCIPES GÉNÉRAUX D'ÉTABLISSEMENT DES MONTAGES D'USINAGE

I. — GÉNÉRALITÉS

Toute fabrication doit donner des produits de qualité au prix de revient le plus bas. Pour atteindre ces deux buts, il faut de bonnes machines, de bons outils et de bons ouvriers mais c'est surtout l'organisation de la fabrication qui assure le meilleur emploi du matériel et de la main-d'œuvre. L'étude de la production en particulier aura comme principaux objectifs la recherche du maximum de précision par élimination des causes d'erreurs dues au facteur humain et l'élimination des temps morts par la rationalisation du matériel.

A. RECHERCHE DE LA PRÉCISION

L'usinage d'une pièce comprend deux phases :

— **sa mise en position sur la machine par rapport à l'outil et à partir de ses surfaces de référence auxquelles toutes ses autres surfaces se rattachent.** C'est la phase la plus délicate et la plus importante de l'usinage.

— l'opération de coupe proprement dite.

La précision dépend surtout de la mise en position et l'ablocage ne doit ni déplacer la pièce ni la déformer. L'opération de coupe ne peut que diminuer cette précision et même la détruire si la machine et l'outillage sont en mauvais état.

B. ÉLIMINATION DES TEMPS MORTS

Les temps morts, ou temps improductifs, rapportés aux temps de coupe, sont d'autant plus importants que l'on utilise des outils à grande vitesse. Par suite, la mise en position de la pièce et son ablocage doivent être, en même temps que précis, le plus rapides possible.

Sur certaines machines spéciales, machines à tailler par exemple, ces deux opérations sont prévues par le constructeur et l'utilisateur ne peut apporter aucune amélioration dans leur exécution.

Au contraire, sur les machines de mécanique générale (tours, perceuses, fraiseuses, raboteuses, rectifieuses, machines à brocher) il faut créer **des porte-pièces spéciaux,** particuliers à chaque pièce, selon ses formes et ses dimensions, pour faciliter la mise en position et l'ablocage. On les désigne le plus souvent sous le nom de **montages d'usinage.**

II. — CONDITIONS QUE DOIT REMPLIR UN MONTAGE D'USINAGE

L'étude d'un montage d'usinage est du domaine de la section de préparation du travail du bureau des méthodes (1). Nous n'envisagerons pas ici toutes les conditions qui s'attachent à cette étude et nous ne retiendrons que les principales.

---

(1) Voir l'ouvrage « Organisation industrielle » (Applications industrielles), page 98, par A. Castell.

A. NOMBRE DE PIÈCES A USINER OU PRODUCTION

Le montage sera d'autant plus nécessaire et à la fois complexe et commode que le nombre de pièces à usiner sera grand. Ainsi, pour des grandes séries, on conçoit des montages qui permettent le fraisage en ligne ou en parallèle au lieu d'un fraisage à l'unité par exemple, ou encore des opérations de perçage, de lamage et d'alésage sans démontage de la pièce.

B. CONSTRUCTION

On peut les prévoir en fonte ou en éléments d'acier soudés. Les montages en éléments soudés sont réalisables plus rapidement et peuvent supporter des contraintes plus élevées. Le soudage électrique déforme moins les éléments que le soudage oxyacétylénique. Le façonnage du montage ne doit se faire qu'après soudage et il faut procéder à un façonnage d'ébauche, un débridage pour équilibrer les tensions, puis un nouveau façonnage de finition.

C. PRÉCISION.

Les faces d'appui sur lesquelles reposent les pièces sont constituées de bossages et non de surfaces entières afin de diminuer les risques d'interposition de copeaux (fig. 465).

Les efforts de coupe doivent tendre à appliquer la pièce contre les appuis et butées.

Le montage est repéré en position sur la table de la machine par des languettes de centrage.

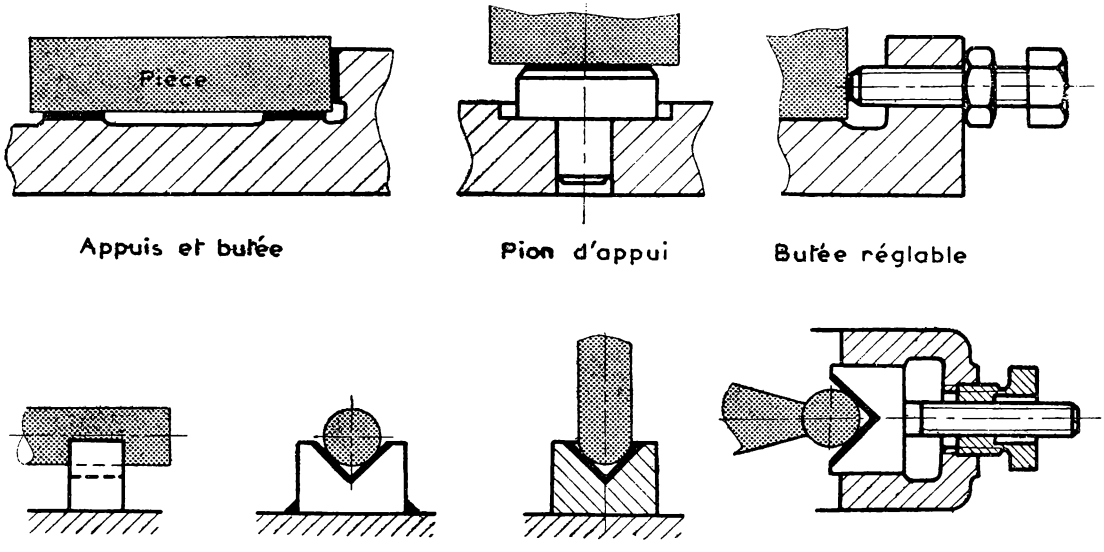


Fig:465 - Appuis et butées.

Le montage doit être massif comparativement à la pièce et aux efforts de coupe afin d'absorber les vibrations. Pour la même raison, il assurera la position de la pièce le plus près possible de la table ou du plateau de la machine.

Des ouvertures de dégagement doivent être prévues pour l'évacuation des copeaux et des liquides.

Pour des pièces brutes, prévoir des points d'appui (généralement 3) et non des surfaces d'appui. Si la surface est grande, y adjoindre des points d'appui réglables (bornes automatiques à ressort).

D. MONTAGE DES PIÈCES.

Les pressions de serrage se feront toujours au droit des points d'appui pour éviter les déformations (fig. 466 et 467).

Les efforts de serrage seront puissants sans demander de la part de l'opérateur une grande fatigue. Parfois, ils seront rendus simultanés par emploi de palonniers ou de coins (fig. 470).

Les dispositifs de serrage doivent être très accessibles à l'opérateur.

E. DÉMONTAGE DES PIÈCES.

Il est facilité par des brides éclipsables remontées par des ressorts, par des rondelles ouvertes, par des cames à double effet (fig. 466 et 467).

F. SÉCURITÉ.

Le montage et le démontage des pièces doivent se faire assez loin de l'outil, surtout s'il est en mouvement (cas du fraisage alternatif par exemple).

Il faut abattre les arêtes et coins vifs qui provoquent des coupures désagréables et préjudiciables à la dextérité de l'ouvrier.

G. NORMALISATION DES ÉLÉMENTS.

Pour diminuer le prix de revient des montages et accélérer leur fabrication, prévoir des éléments normalisés (normes d'usine) et en réduire le nombre le plus possible. Les figures 466, 467, 468 et 469 représentent des éléments courants normalisés.

III. — TYPES DE MONTAGES D'USINAGE

Quoique les montages d'usinage soient particuliers à chaque pièce en raison de sa forme, de ses dimensions et de l'opération de coupe envisagée, ils présentent tous des similitudes de principe et peuvent être conçus à partir d'éléments types. Les figures 470 à 479 illustrent quelques montages à ablocage manuel. Nous avons jugé superflu de les accompagner d'un texte explicatif.

La figure 480 est un type de montage à commande pneumatique. L'effort humain est remplacé par un serrage plus énergique, plus rapide et réglable. La pression d'utilisation (environ 10 $kg.f/cm^2$) donne un effort de serrage contrôlable (pression d'appui) qui peut atteindre plusieurs tonnes. Les organes de bridage sont analogues à ceux qu'on utilise pour les ablocages manuels.

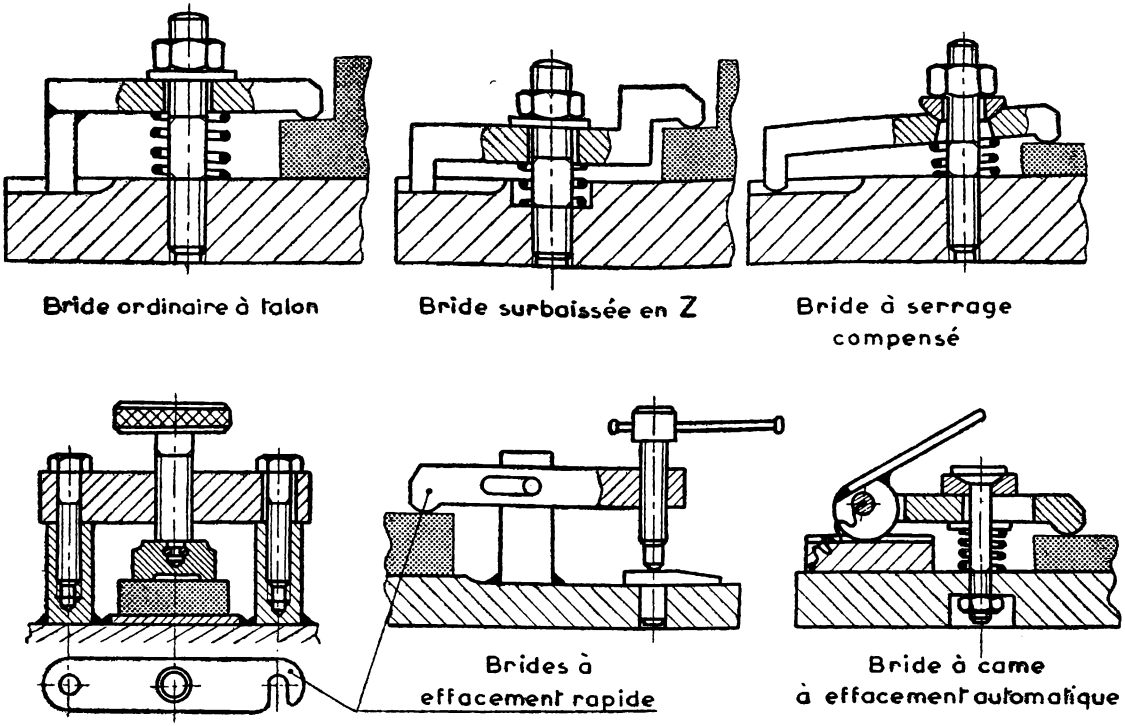

Bride ordinaire à talon
Bride surbaissée en Z
Bride à serrage compensé
Brides à effacement rapide
Bride à came à effacement automatique

Fig: 466 - Brides et bridages.

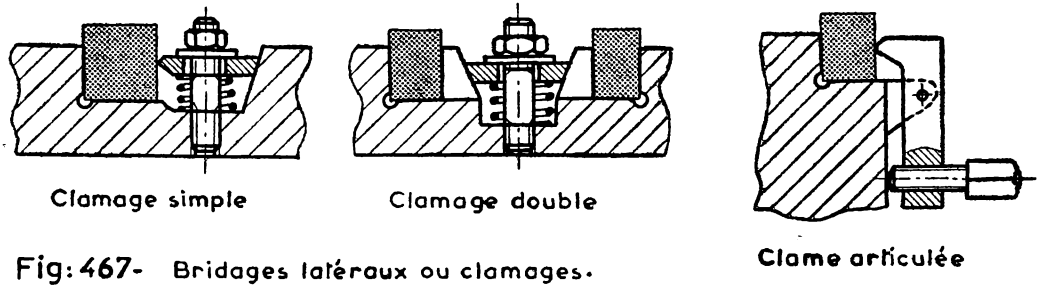


Fig: 467- Bridages latéraux ou clamages.

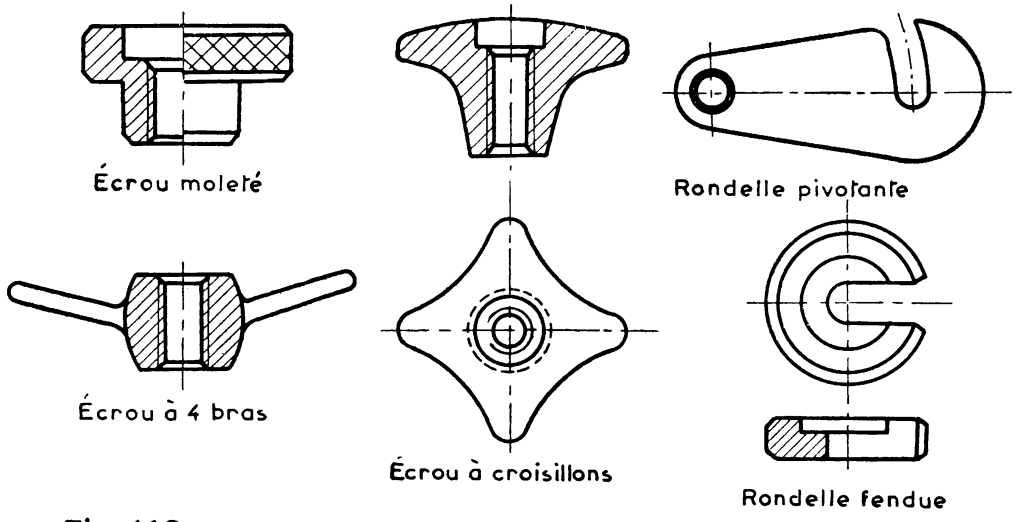


Fig:468 - Rondelles et écrous spéciaux.

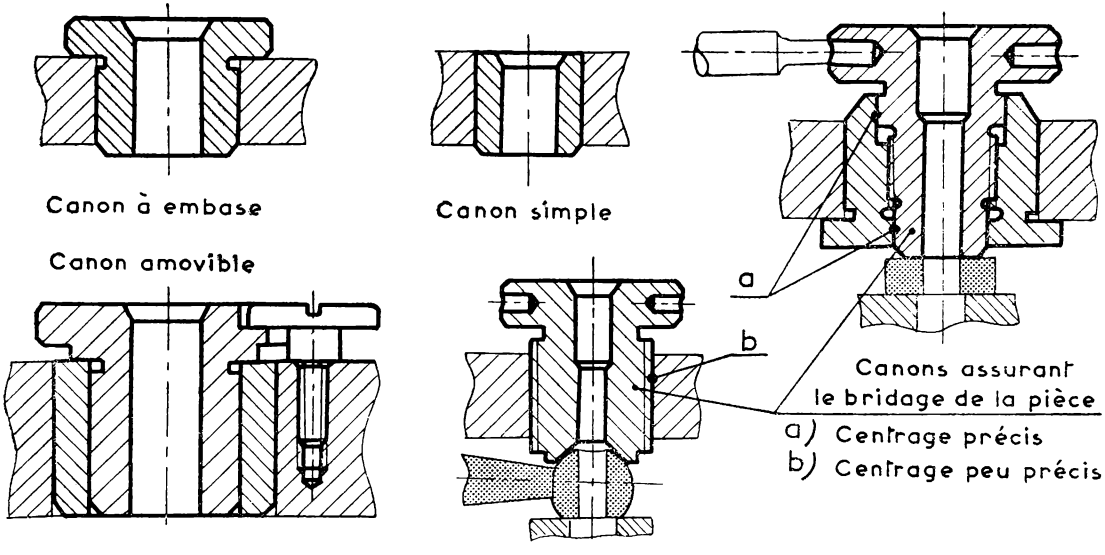


Fig : 469 - Canons guide-foret ou guide-alésoir.

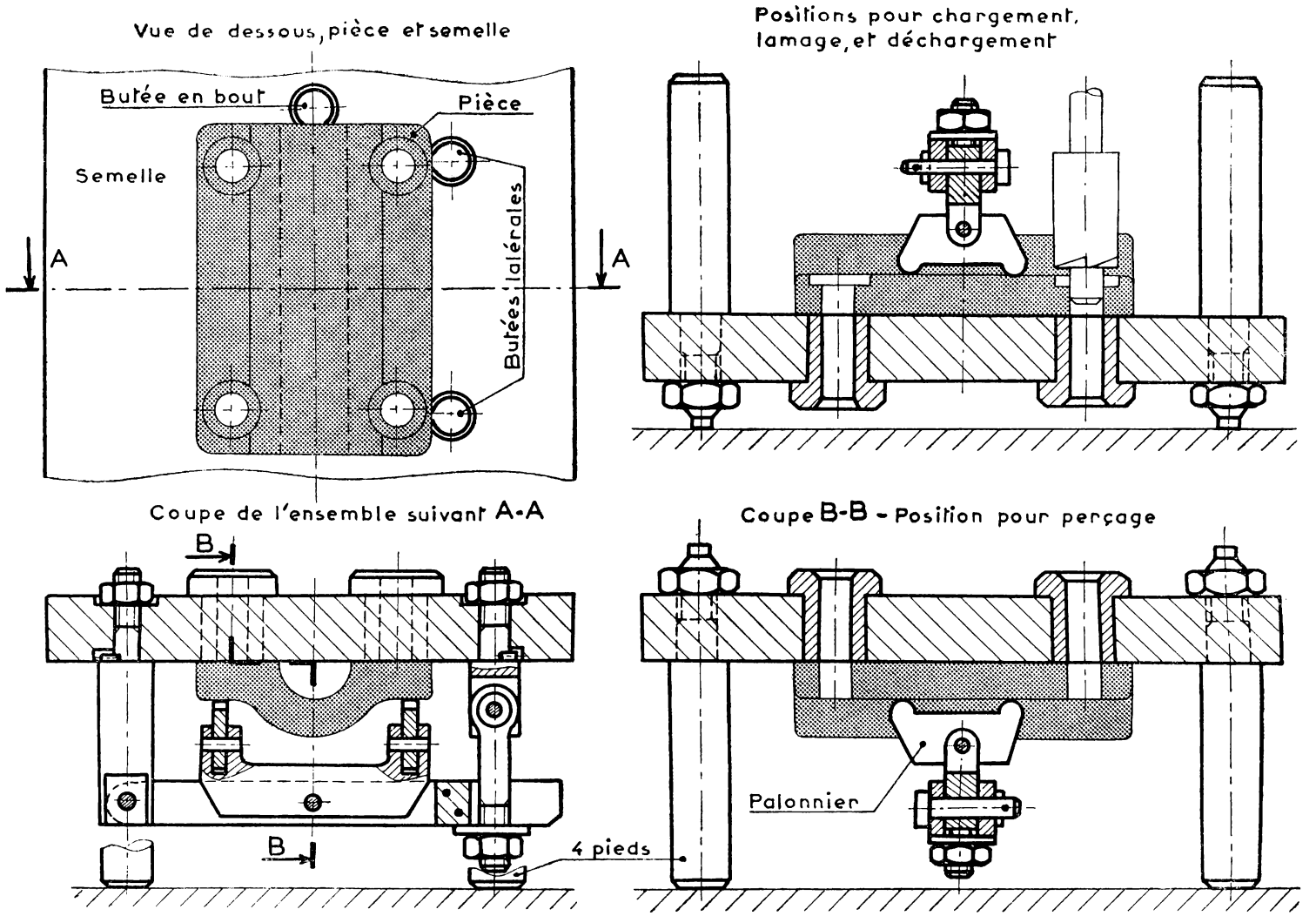


Fig:470 - Montage de perçage et de lamage.

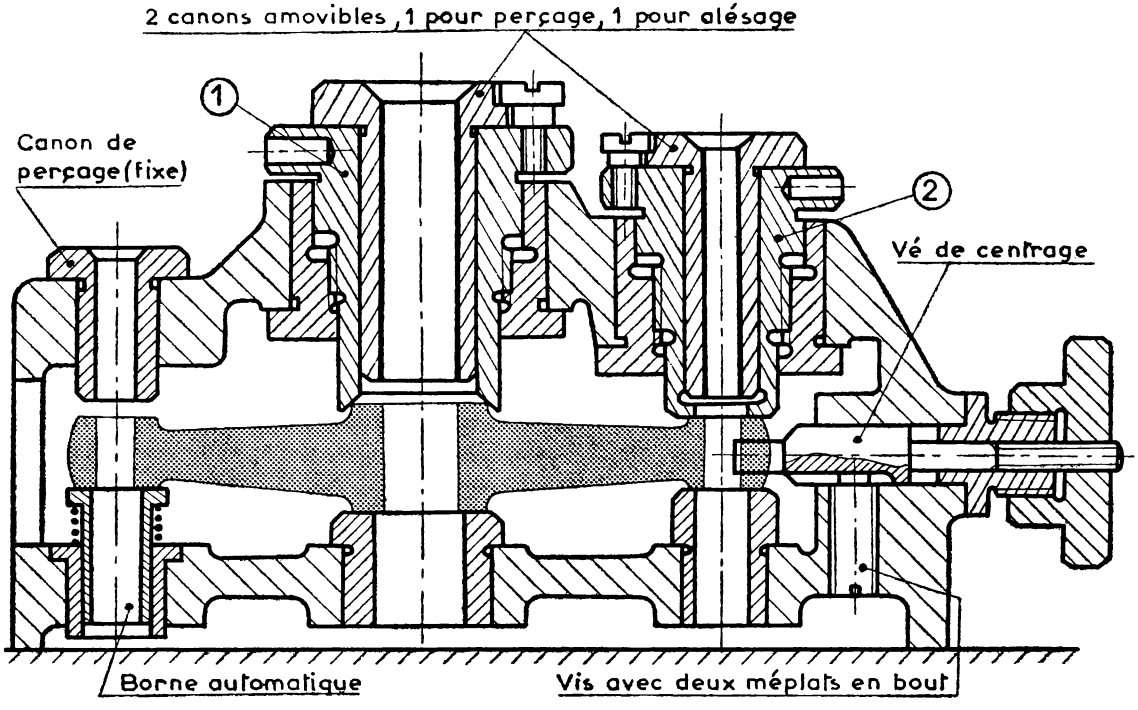


Fig:471- Montage de perçage et d'alésage.

Le montage est ouvert sur ses deux grandes faces pour son chargement et son déchargement.

Le bridage de la pièce est conduit de la façon suivante :

- appuyer le canon de serrage (1),
- appuyer le vé de centrage,
- bloquer le canon (1) puis le canon (2),
- bloquer la borne automatique.

L'usinage est réalisé en deux temps : perçage puis alésage au foret aléseur.

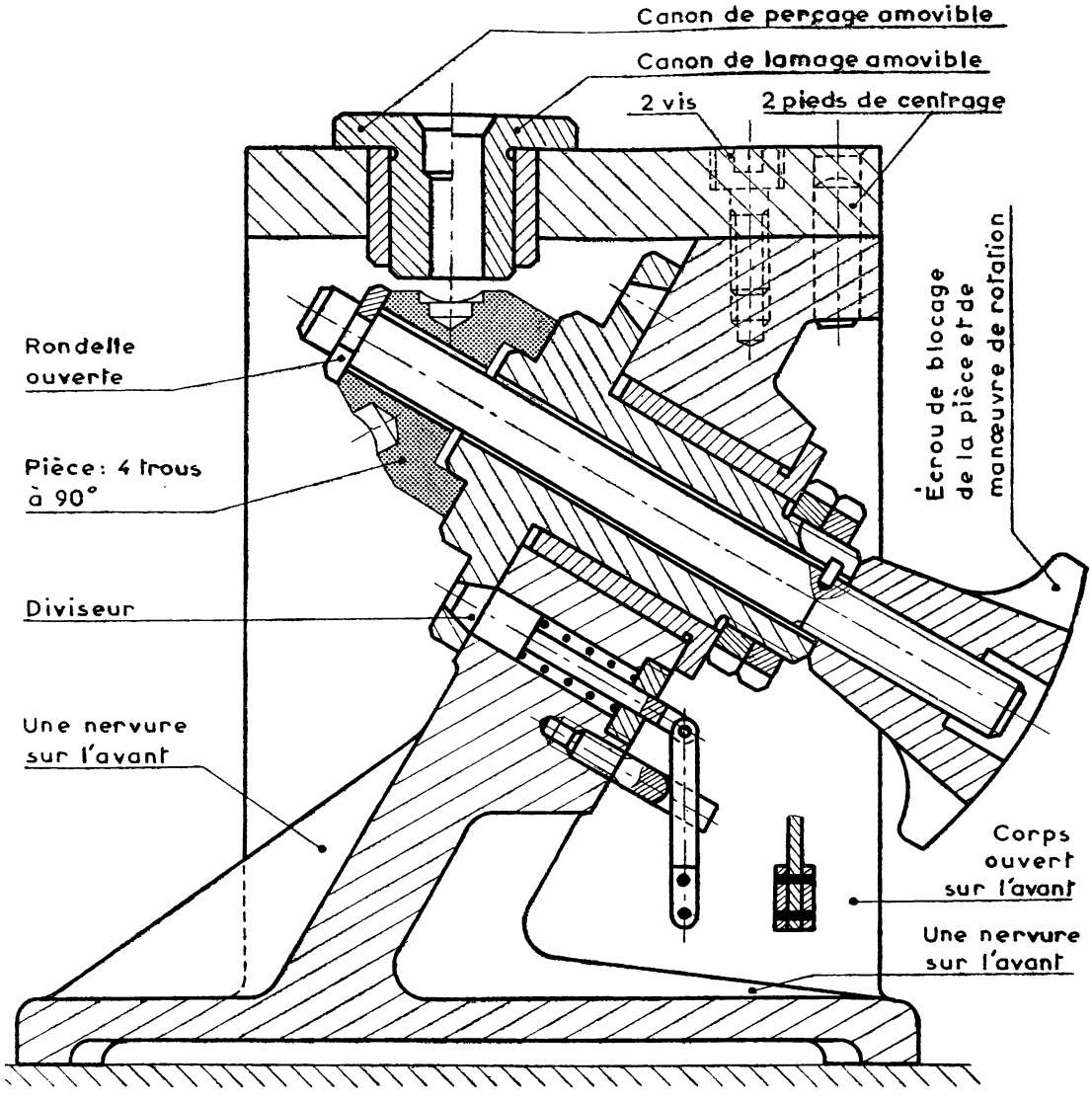

Canon de perçage amovible
Canon de lamage amovible
2 vis
2 pieds de centrage
Écrou de blocage de la pièce et de manœuvre de rotation
Rondelle ouverte
Pièce: 4 trous à 90°
Diviseur
Une nervure sur l'avant
Corps ouvert sur l'avant
Une nervure sur l'avant

Fig: 472 - Montage de perçage et de lamage à diviseur. Le corps du montage est moulé. Il pourrait être avantageusement réalisé par éléments soudés.

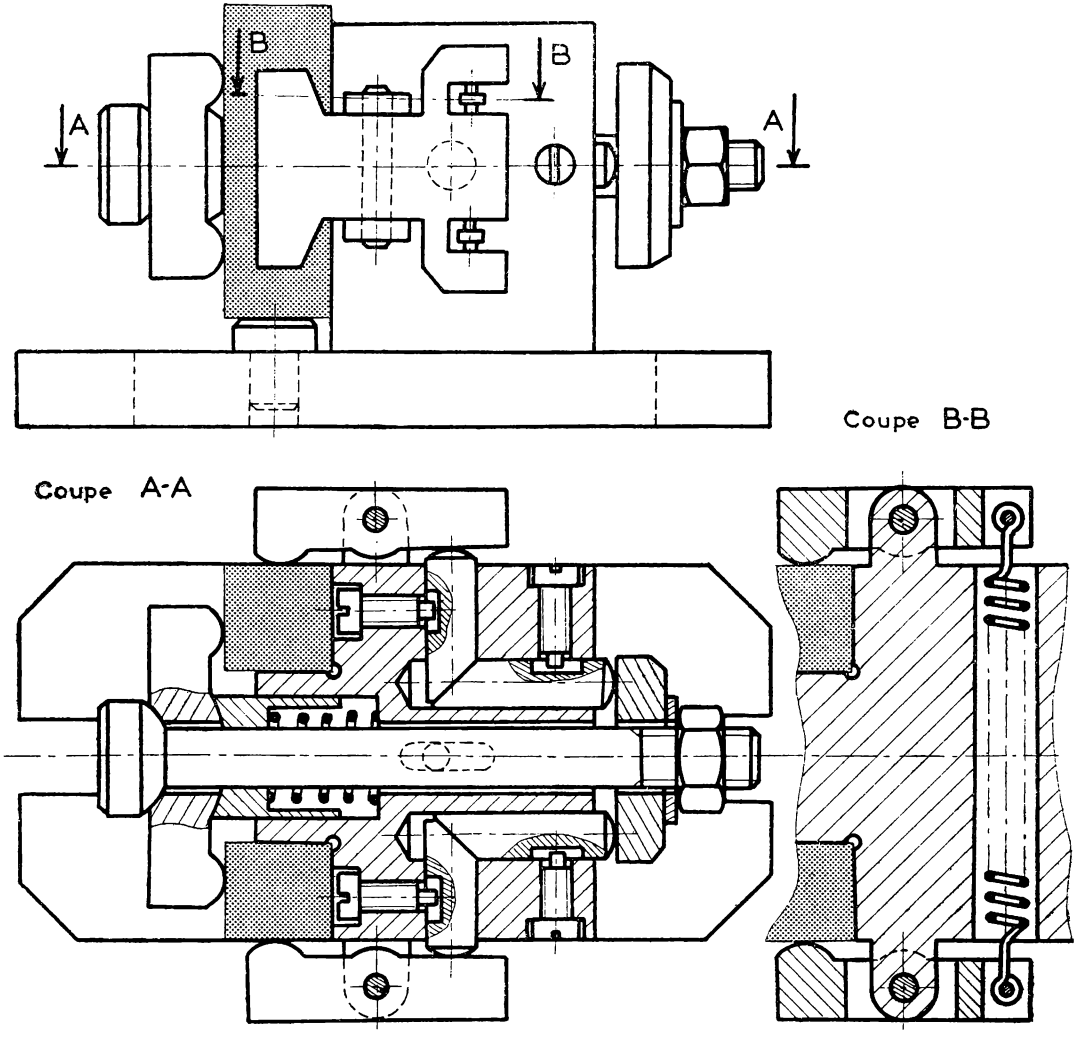


Fig: 473- Montage de fraisage.
Les quatre doigts des renvois d'angle sont traités.

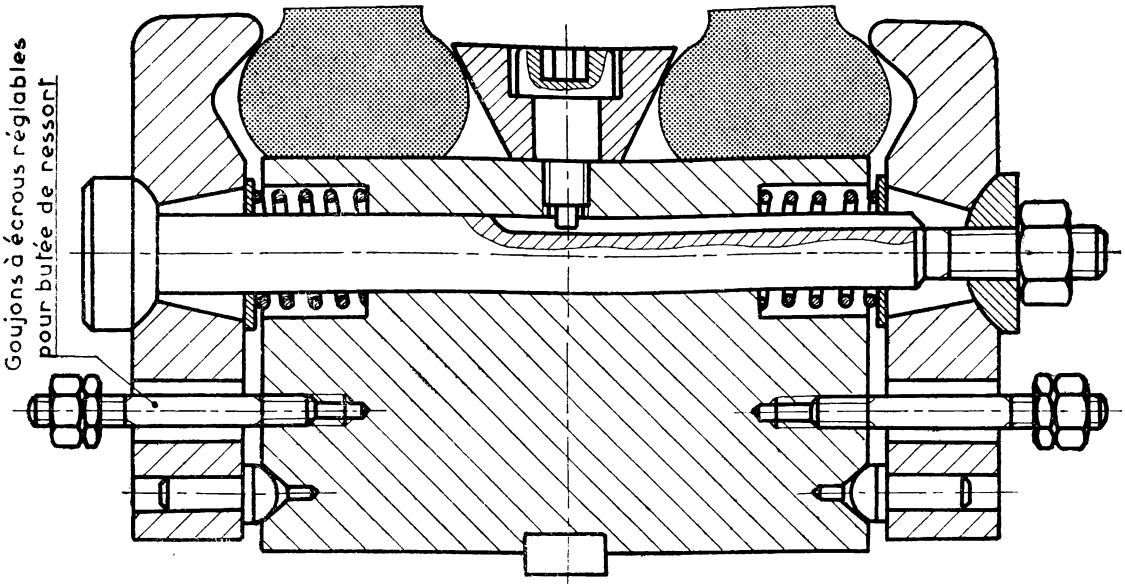


Fig:474- Montage de fraisage

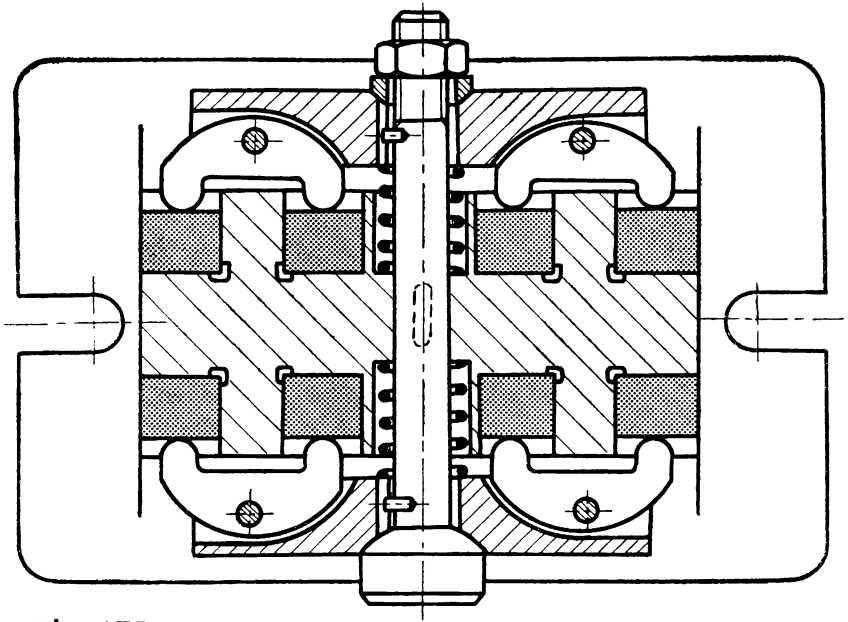
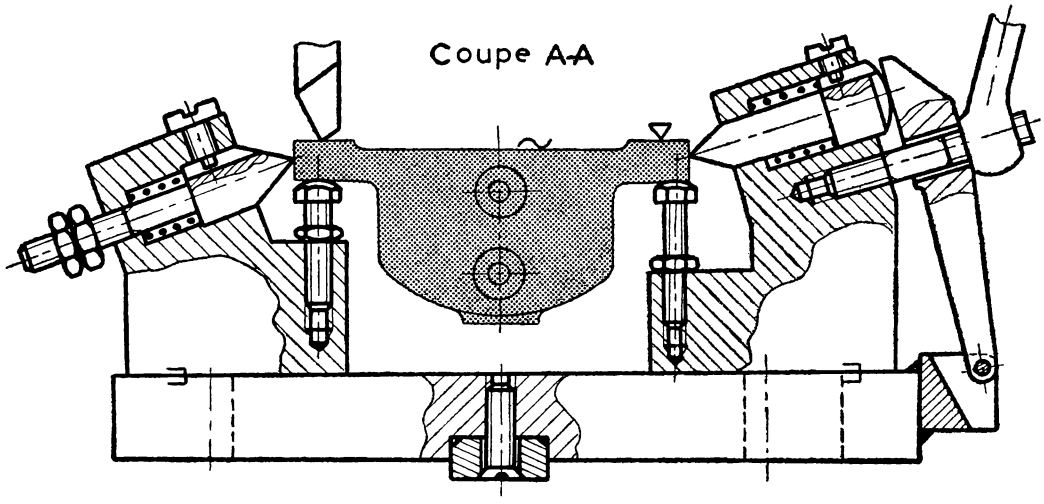


Fig:475- Principe d'un montage de huit pièces en ligne et en parallèle.



Vue de dessus

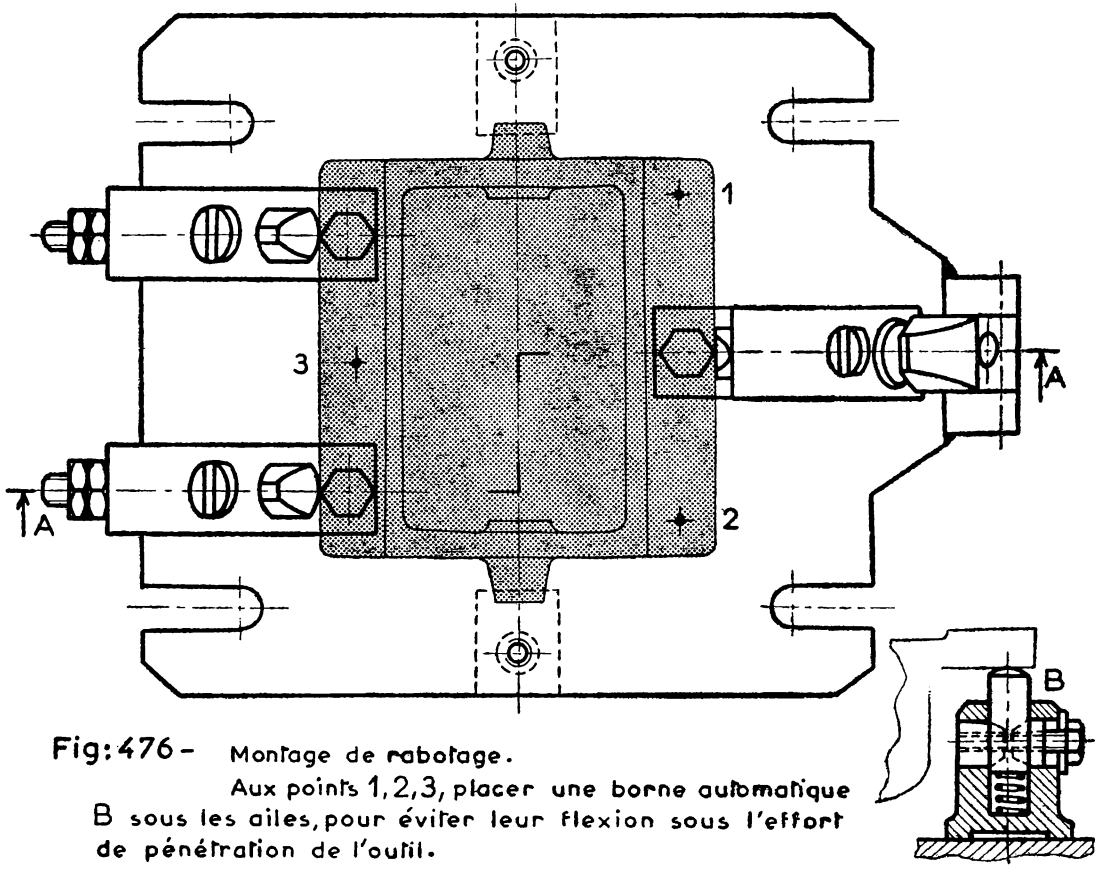


Fig: 476 - Montage de rabotage.
Aux points 1, 2, 3, placer une borne automatique B sous les ailes, pour éviter leur flexion sous l'effort de pénétration de l'outil.

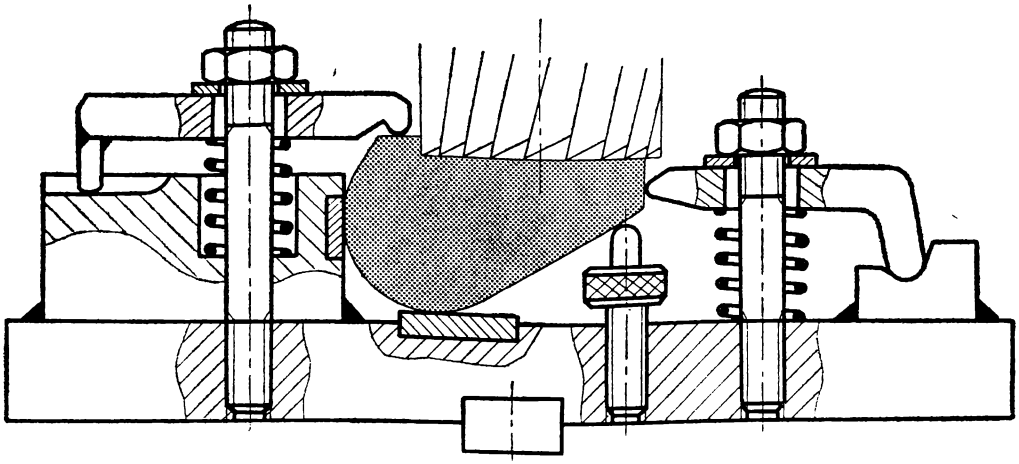


Fig: 477- Montage de fraisage.

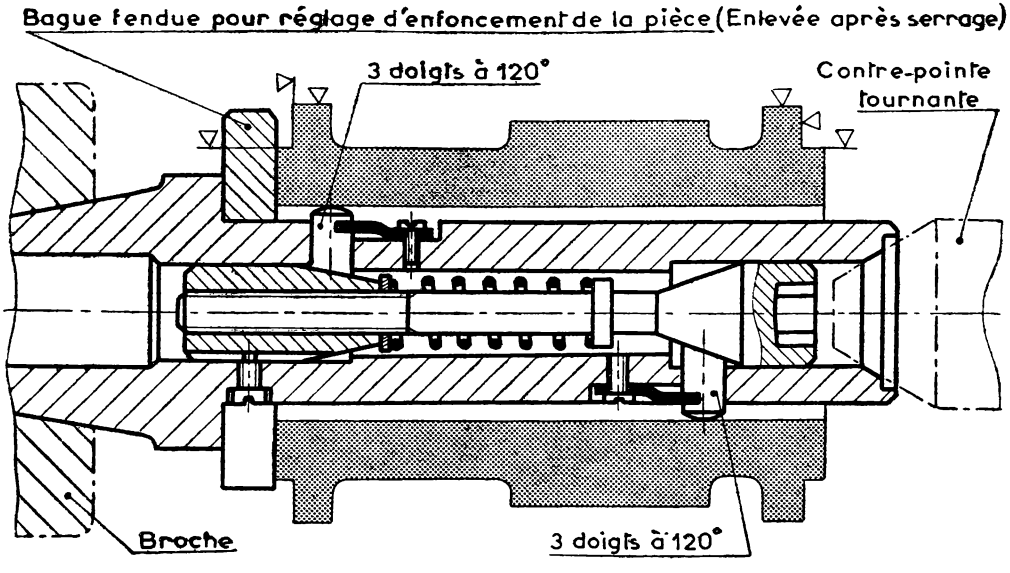

Bague fendue pour réglage d'enfoncement de la pièce (Enlevée après serrage)
3 doigts à 120°
Contre-pointe tournante
Broche
3 doigts à 120°

Fig:478- Montage de tournage avec serrage sur le brut.
Le mandrin, les six doigts et les deux cônes sont traités.

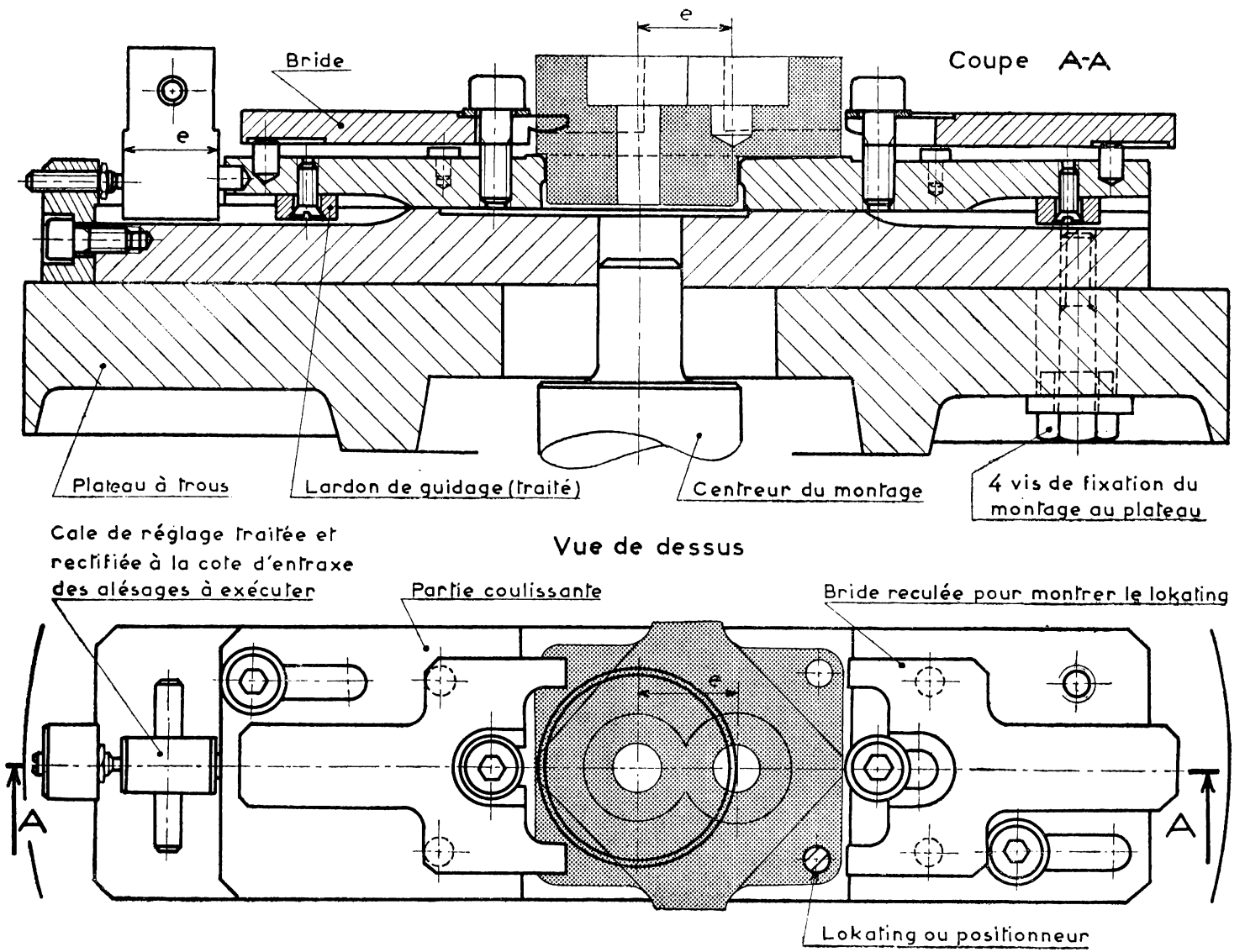


Fig: 479- Montage de fournage pour usinage d'un corps de pompe à huile en petite série.

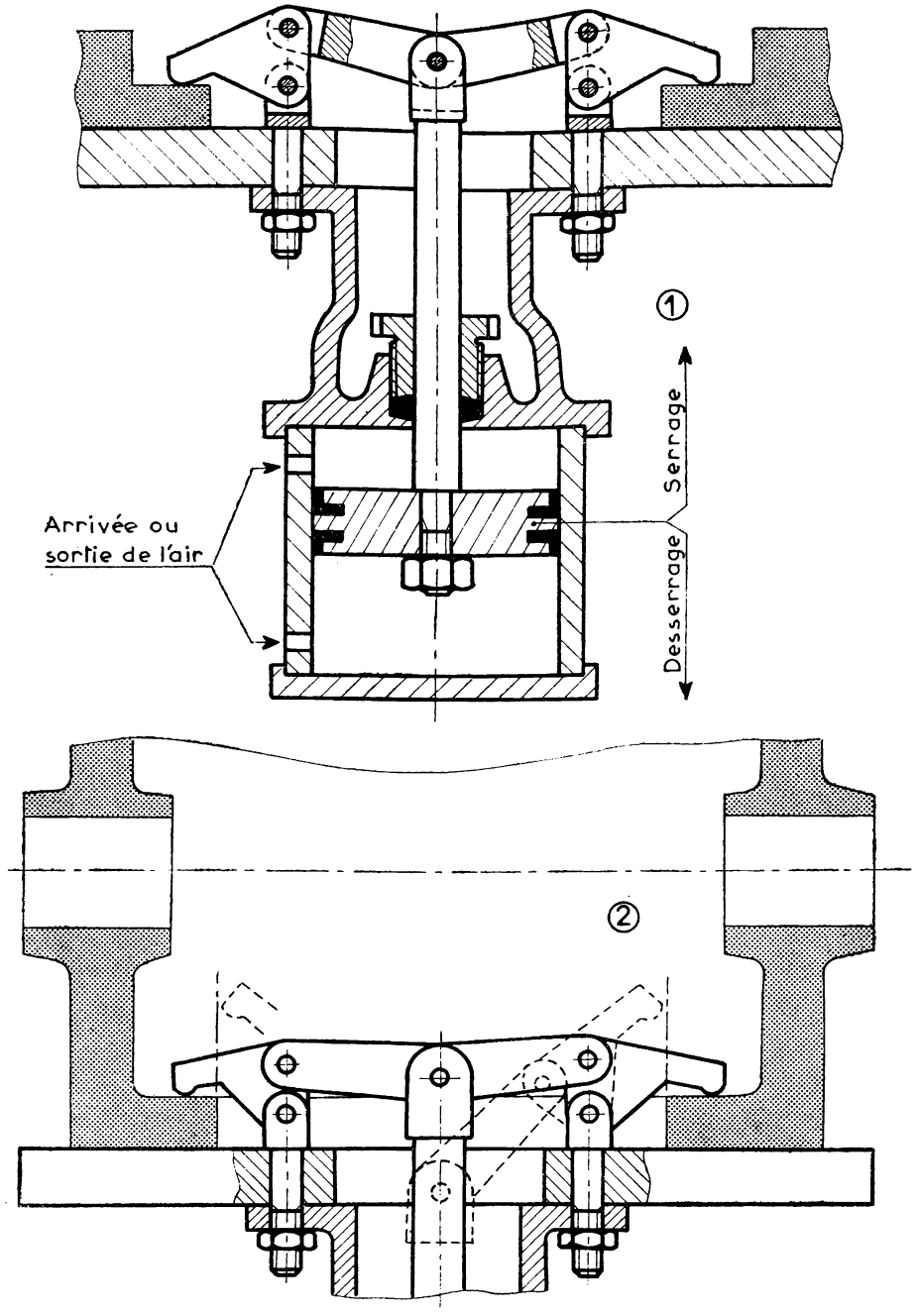


Fig:480 - Montage d'usinage à serrage pneumatique

① Serrage par l'extérieur pour les pièces montées en ligne.

② Serrage par l'intérieur pour alésage d'un carter.

ÉTABLISSEMENT D'UNE GAMME D'USINAGE

I. — GÉNÉRALITÉS

Pour obtenir une production de qualité au prix de revient optima, il faut la préparer. En aucun cas, l'ouvrier qui exécute le travail ne doit tâtonner pour aboutir à un moyen de fabrication qu'il juge bon, mais pour lequel il n'a pas mis en jeu tous les éléments dont l'atelier peut disposer. Il faut laisser à l'ouvrier seulement la charge de conduire sa machine avec le maximum d'efficacité et le libérer de toutes les tâches annexes auxquelles il ne s'est pas préparé.

Les instructions qu'il recevra, élaborées au bureau des méthodes par les techniciens avertis de la section de préparation du travail, constituent **la gamme d'usinage,** document d'autant plus important et nécessaire que la pièce est complexe et que la production est importante

En fabrication unitaire non renouvelée et lorsque les opérateurs ont les qualités professionnelles requises, la gamme est souvent laissée à l'initiative de l'ouvrier. Cette pratique ménage la qualité du travail mais conduit à un prix de revient toujours plus élevé.

II. — BASES DE L'ÉTABLISSEMENT D'UNE GAMME D'USINAGE

En fait, **la gamme d'usinage est l'ordre** d'après lequel la fabrication sera conduite. Établir une gamme d'usinage, c'est donc résoudre un problème technique sans rien laisser au hasard et cela suppose que toutes les données qui permettent d'en trouver la meilleure solution sont connues, soit :

— le dessin de l'élément à fabriquer et le plan de l'ensemble auquel il se rapporte ;

— les moyens de production de l'entreprise (personnel et matériel) ;

— la production envisagée ;

— les délais de fabrication.

Ainsi, chaque cas est un cas particulier et il est difficile d'établir des règles générales universellement applicables. Il faut chaque fois analyser, c'est-à-dire :

a) **Décomposer** le problème général en problèmes partiels correspondant chacun à un point précis ;

b) **Rechercher** toutes les solutions qui s'appliquent à chaque problème partiel ;

c) **Comparer** toutes ces solutions pour retenir celle qu'on juge la meilleure ;

d) **Ordonner** les solutions partielles retenues.

C'est ce regroupement qui constitue **la gamme d'usinage** appelée aussi **analyse de fabrication.**

TERMINOLOGIE.

Avant de passer à l'étude d'un cas concret, nous rappellerons ci-après quelques termes techniques d'usage courant :

— **Surfaces de référence SR :** surfaces liées à la fonction de la pièce et à partir desquelles toutes les autres surfaces seront façonnées ;

— **Opération :** usinage d'une surface isolée ou de surfaces associées ;

— **Phase :** ensemble des opérations réalisées sur une même machine avec ou sans démontage intermédiaire de la pièce ;

— **Sous-phase :** partie d'une phase réalisée sans démontage de la pièce. Il y a donc autant de sous-phases qu'il y a de mises en place de la pièce ;

— **Travail unitaire :** jusqu'à 5 pièces environ ;

— **Petite série :** 5 à 50 pièces ;

— **Moyenne série :** 50 à 500 pièces ;

— **Grande série :** 500 à 5 000 pièces ;

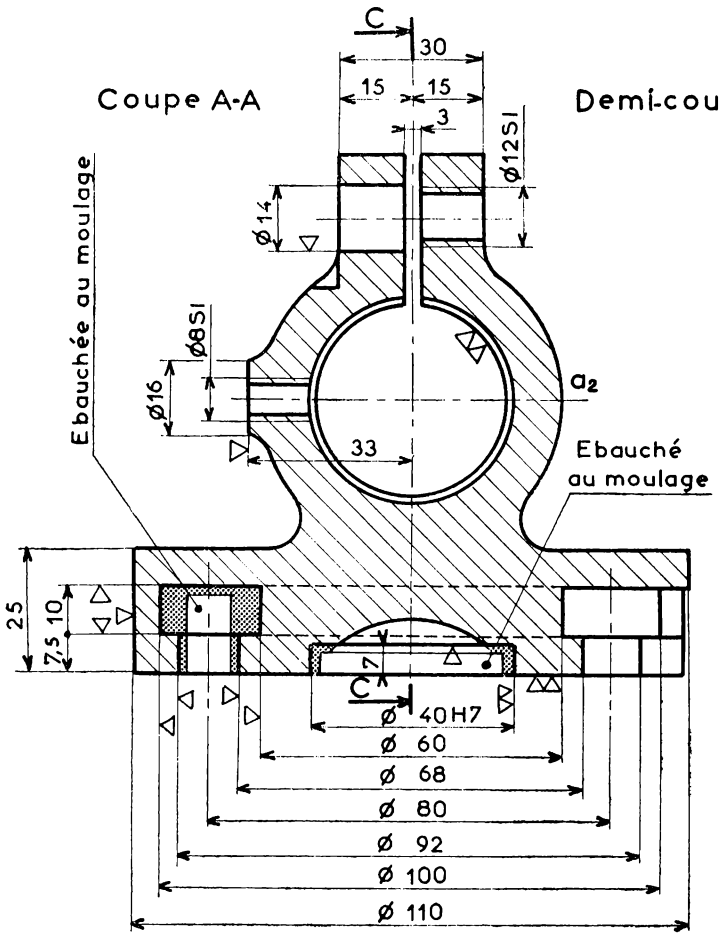
— **Très grande série :** plus de 5 000 pièces ;

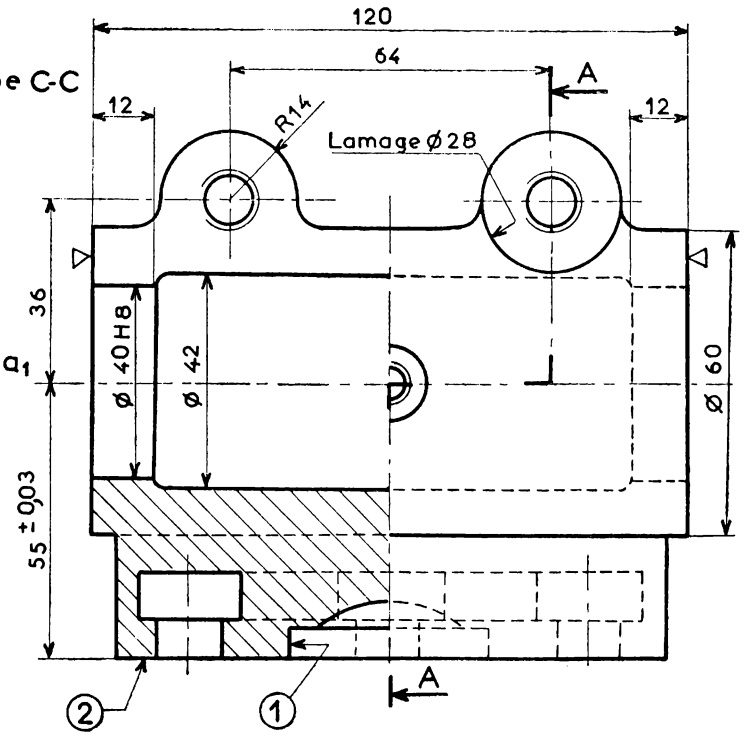
— **Série illimitée :** la fabrication est continue et elle peut s'étaler sur plusieurs mois et même plusieurs années.

III. — ÉTABLIR LA GAMME D'USINAGE DE LA PIÈCE Fig. 481 POUR UNE PETITE SÉRIE DE 10 PIÈCES

Le faible nombre de pièces à exécuter ne justifie pas l'étude poussée de la gamme de fabrication ni surtout l'établissement de montages d'usinage onéreux. Il faut en effet pouvoir amortir les dépenses annexes et en tirer un bénéfice. Il ne servirait à rien, par exemple, d'économiser dix heures de travail ou de réflexion de l'ouvrier si on devait consacrer à cette économie quinze heures d'étude et de travail d'agent technique. Mais il ne faut pas non plus négliger, pour les très faibles séries, l'intervention du bureau des méthodes.

En général, dans ce cas, il est très rentable d'utiliser les machines courantes et les appareillages classiques normalisés dans l'usine — sans rien créer — mais en prévoyant en détail leur adaptation et leur montage, sous forme d'instructions, bien avant l'exécution du travail.





Surépaisseurs d'usinage: 4 mm
L'alésage, la rainure en té et l'embrèvement du centrage sont ébauchés au moulage.

Fig: 481 - SUPPORT RÉGLABLE

Pièce N° 10.05.03	Fonte moulée Ft.18

La semelle du support réglable est tournée extérieurement parce qu'elle sert de guide et de butée à un support de tringlerie orientable en rotation.

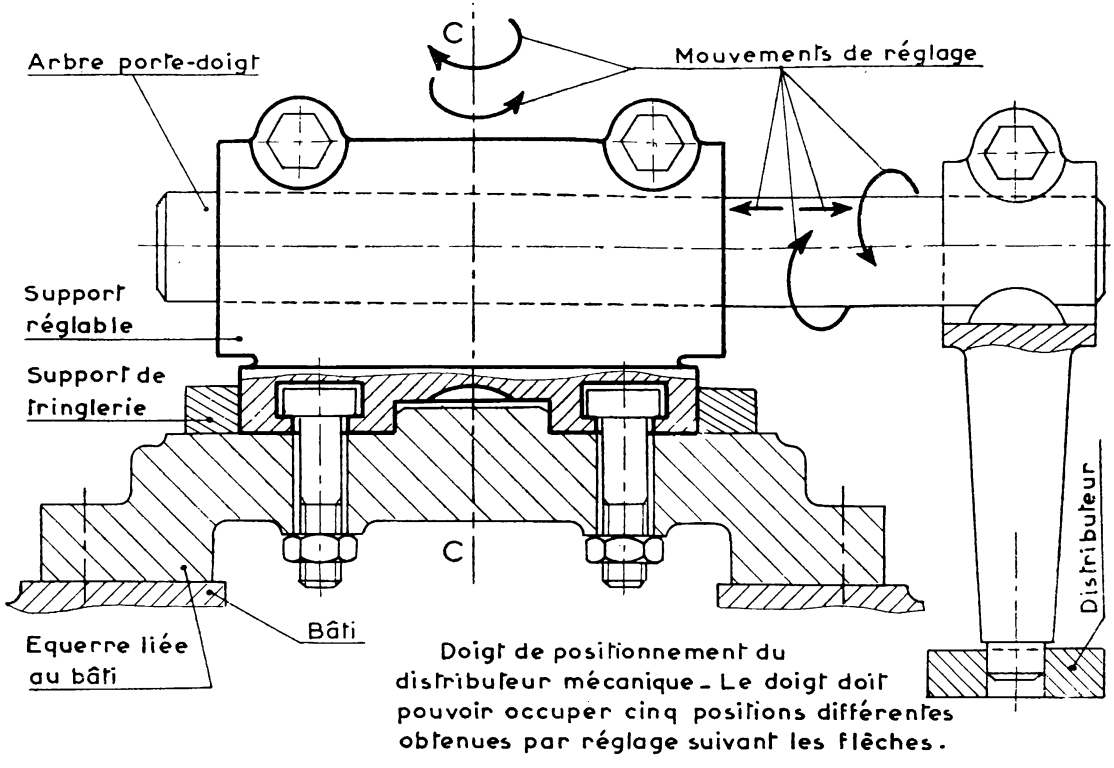
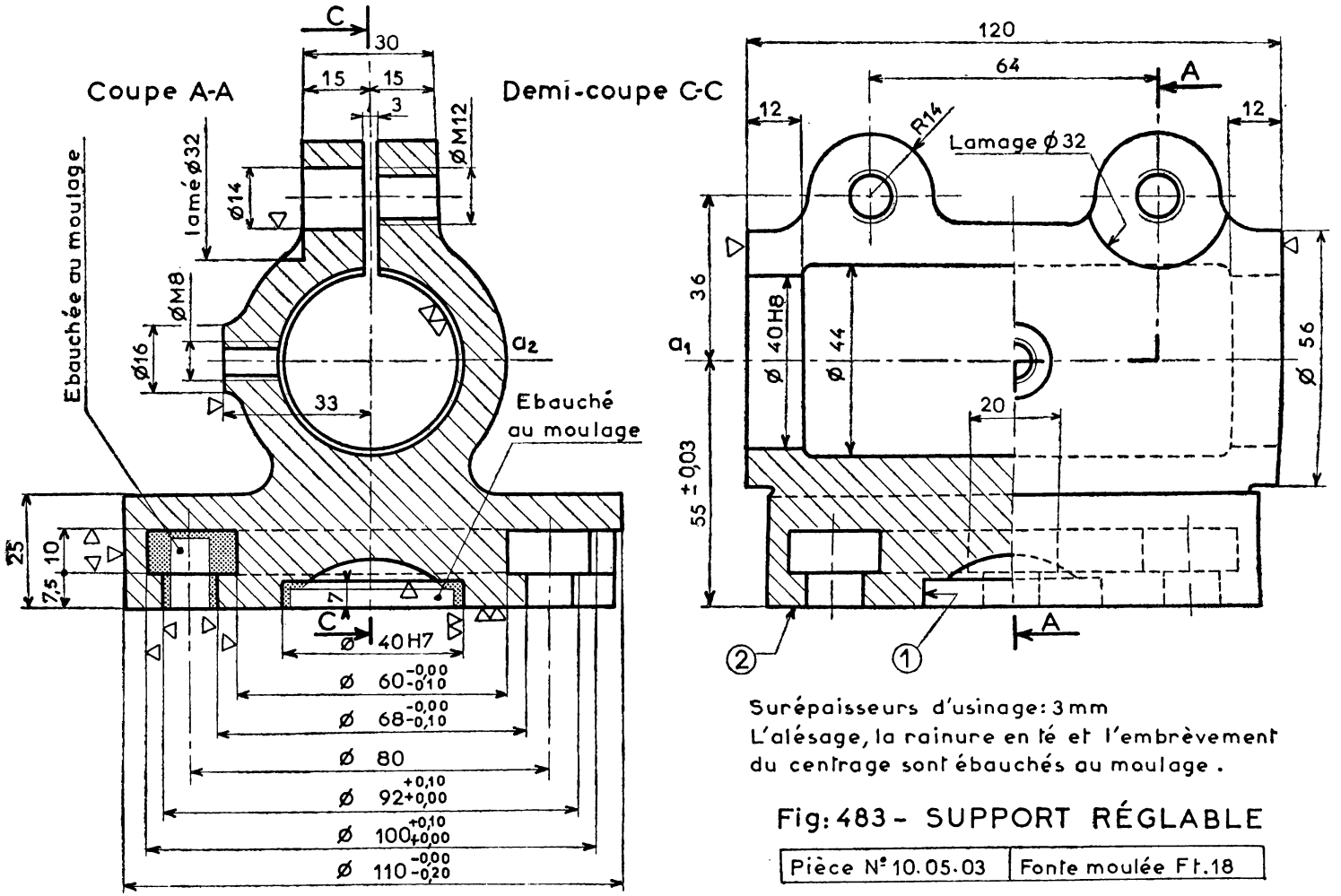


Fig:482 - Schéma montrant le rôle fonctionnel du support.

A. ÉTUDE DU DESSIN.

Ce qu'il spécifie	Ce qu'il faut en déduire
Matière : fonte ft 18	Matériau à outil (outil carbure), travail à sec, vitesse de coupe de base. Pas de traitements thermiques, donc pas de réserves pour ces traitements ni de contrôle des nouvelles propriétés mécaniques.
Forme et dimensions : surfaces planes et de révolution pièce de capacité moyenne	Bonne rigidité de la pièce, peut supporter des efforts d'ablocage et de coupe normaux. Machines de capacité moyenne. Ne demandent pas d'accessoires standards tels que lunette à suivre, bornes automatiques...
Positions relatives des surfaces : elles sont parallèles, concentriques ou orthogonales entre elles	Choix des surfaces de référence : les axes a_1 et a_2 sont les lignes de départ qui fixent la position de toutes les surfaces. Les surfaces à usiner au cours de la première phase sont les surfaces 1 et 2 qui deviendront les surfaces de référence pour les opérations ultérieures.
Signes de façonnage : un ou deux triangles associés à des qualités 7 et 8.	État des surfaces et qualités 7 et 8 : machines de bonnes qualités géométriques. Aucune opération de rectification ou de grattage. Pour le contrôle : calibres à limites, pied à coulisse et tampons filetés. Aucun appareillage spécial de contrôle.
Spécifications particulières.	Alésage, centrage et rainure en té sont ébauchés au moulage. Surépaisseur d'usinage : 3 *mm*.



Surépaisseurs d'usinage: 3 mm
L'alésage, la rainure en té et l'embrèvement du centrage sont ébauchés au moulage.

Fig: 483 - SUPPORT RÉGLABLE

Pièce N° 10.05.03	Fonte moulée Ft.18

Dessin mis au point après première étude de la gamme d'usinage, c'est-à-dire en « pensant » fabrication

B. DISCUSSION DE LA GAMME D'USINAGE.

Nous ne présenterons pas les documents tels qu'ils devraient être rédigés pratiquement, mais nous justifierons, assez succinctement, chaque solution retenue.

La suite des phases est numérotée 1-0, 2-0, 3-0... au lieu de 1, 2, 3... Cette numérotation permet, en cas de modification par emploi de matériel ou d'outillage nouveaux, d'intercaler des solutions nouvelles.

Phase 1-0. Usinage de la semelle (fig. 484).

La réalisation des surfaces 1, 2, 3, 4 impose tout naturellement le tournage.

La rainure circulaire en té pourrait être exécutée à la fraiseuse au plateau circulaire, mais ce procédé impliquerait un montage et un temps de coupe très longs. Cette rainure étant aussi réalisable par tournage, nous retiendrons cette formule qui évitera d'ailleurs une reprise, puisque les surfaces 1, 2, 3, 4 sont déjà tournées.

Au cours de l'usinage de la rainure en té, on peut craindre une déformation de la face 1, qui est usinée avant elle et comme, d'autre part, cette surface ainsi que la face 2 sont des surfaces de référence, elles seront terminées en fin de phase et on ordonnera les opérations comme suit :

— ébauche de 1, 2, 3, 4;

— finition de 4;

— ébauche puis finition de 5, 6 et de la partie de 9 au droit de l'entrée de la rainure;

— finition de 7, 8, 9, 10;

— demi-finition de 1, 2, 3;

— finition de 1, 2, 3.

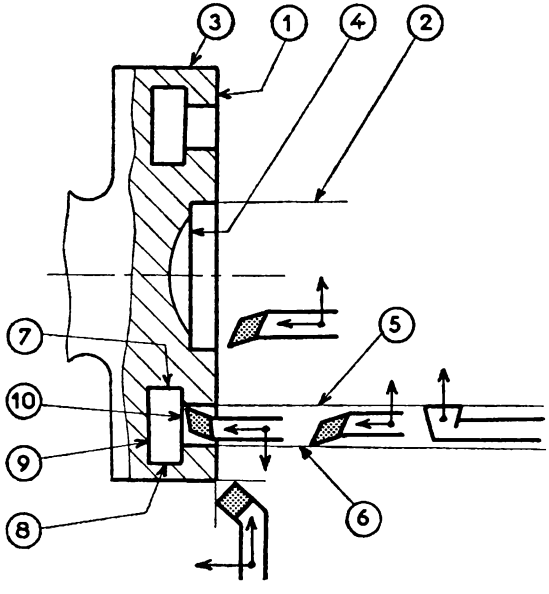


Fig:484 - Usinage de la semelle.

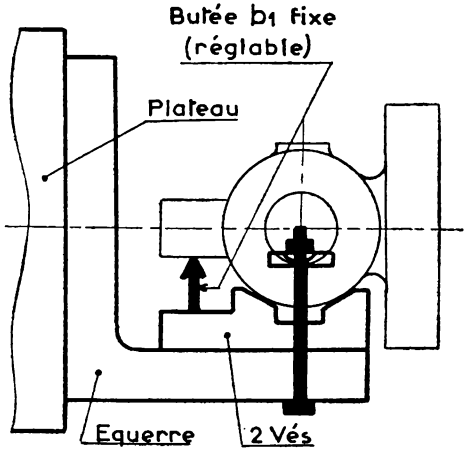


Fig:485 - Montage en équerre sur plateau.

Remarque. Pour l'usinage de la partie 7, on utilisera le même outil que pour l'usinage de 8, mais il sera monté pour tournage à l'envers.

On pourrait de même, pour l'usinage de la face 5, monter à l'envers l'outil qui a servi à l'usinage de la face 6.

Machine.

Tour parallèle à charioter dont l'équipement électrique comporte un contacteur-inverseur de marche pour permettre le tournage à l'envers.

Montage.

Un montage sur équerre simple standard (fig. 485) aménagée avec bridage par l'intérieur de l'alésage brut semblerait suffisant à première vue. Cependant des vibrations sont fort à craindre

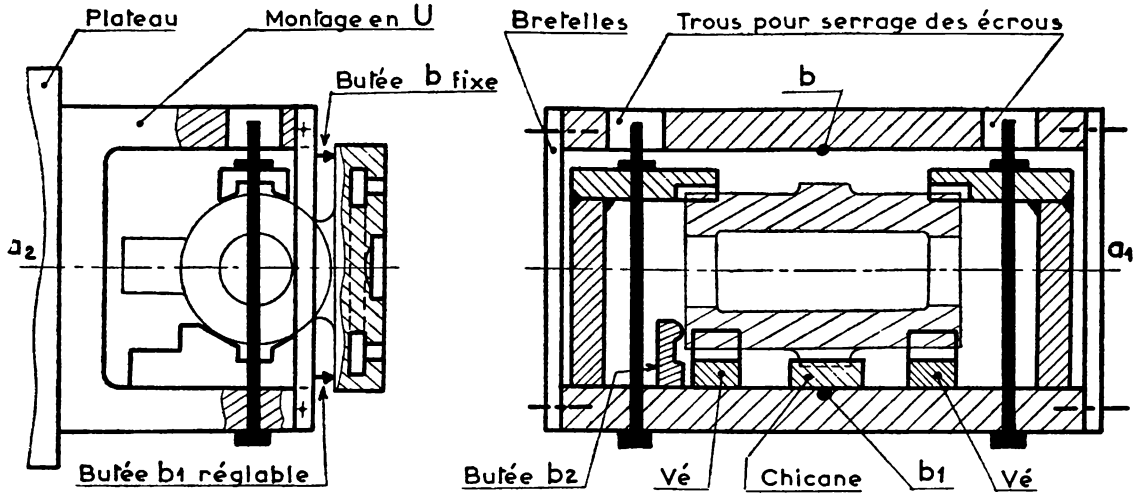


Fig: 486 - Montage en U sur plateau pour usinage de la semelle.

de la part de la branche de soutien qui est en porte-à-faux, et de la part de la pièce dont la partie supérieure est en porte-à-faux elle aussi. L'équerre sera donc remplacée par un **U** standard (fig. 486) et ses deux branches seront reliées par des bretelles. La pièce sera bridée par le dessus. L'évidement des brides et des vés répartissant l'effort de serrage de chaque côté de l'axe évitera une déformation de la pièce et l'ablocage sera énergique. D'autre part, le montage sur **U** apporte le gros avantage de supprimer presque totalement le balourd provoqué par le montage sur équerre.

Choix des surfaces de référence.

Pour cette première phase, comme nous l'avons déjà mentionné lors de l'étude du dessin, ce sont les axes a_1 et a_2 qui seront choisis comme références. L'axe a_1 détermine la hauteur des appuis en vé et leur alignement pour l'orientation de la pièce, car a_1 doit être à hauteur de l'axe de la broche, et parallèle à la face du plateau.

L'axe $\mathbf{a_2}$ détermine la longueur de la butée fixe réglable **b**, de la butée réglable $\mathbf{b_1}$ et de la butée en bout fixe $\mathbf{b_2}$.

Comme les surfaces d'appui et les surfaces de butée sont à l'état brut, pour que le positionnement de chaque pièce soit sensiblement identique, une chicane contre laquelle viendrait buter le bossage du trou radial taraudé empêche le montage sens dessus dessous.

Contrôle.

Contrôle du diamètre 40 H7 au tampon lisse ou à la jauge plate, des diamètres 68, 92 et 110 au pied à coulisse, des profondeurs 7,5 et 17,5 au pied de profondeur. Les deux branches du té ont été contrôlés au vernier au cours de leur exécution.

Phase 2-0. Dressage des bouts.

Le dressage des bouts est réalisable par fraisage à l'aide d'une fraise 2 tailles, d'une fraise 3 tailles épaisse ou d'une fraise-tourteau.

Ces deux opérations sont aussi réalisables au tour (montage en équerre sur plateau). Il apparaît même que l'alésage à l'outil à aléser pourrait être réalisé au cours de la même phase. Mais le diamètre de l'alésage, $40 - 3 \times 2 = 34$ *mm*, ne permet que le passage d'un corps d'outil de diamètre $\simeq 25$ *mm*. Or, le rapport $\frac{\mathbf{L}}{\varnothing} = \frac{120}{25} \simeq 5 > 2{,}5$ est trop grand.

L'alésage ne pouvant se faire dans de bonnes conditions, nous retiendrons le dressage à la fraiseuse. La rotation du plateau de tour aurait d'ailleurs imposé un équilibrage de l'ensemble.

Sous-phase 1 et montage sur fraiseuse universelle (fig. 487).

Pour le dressage d'un premier bout, centrage par $\mathbf{SR_1}$ sur cochonnet centreur à languette ajustée dans une rainure de la table et fixé par boulon, appui sur $\mathbf{SR_2}$ directement sur la table, orientation sur brut par butée fixe réglable $\mathbf{b_3}$, ablocage par brides.

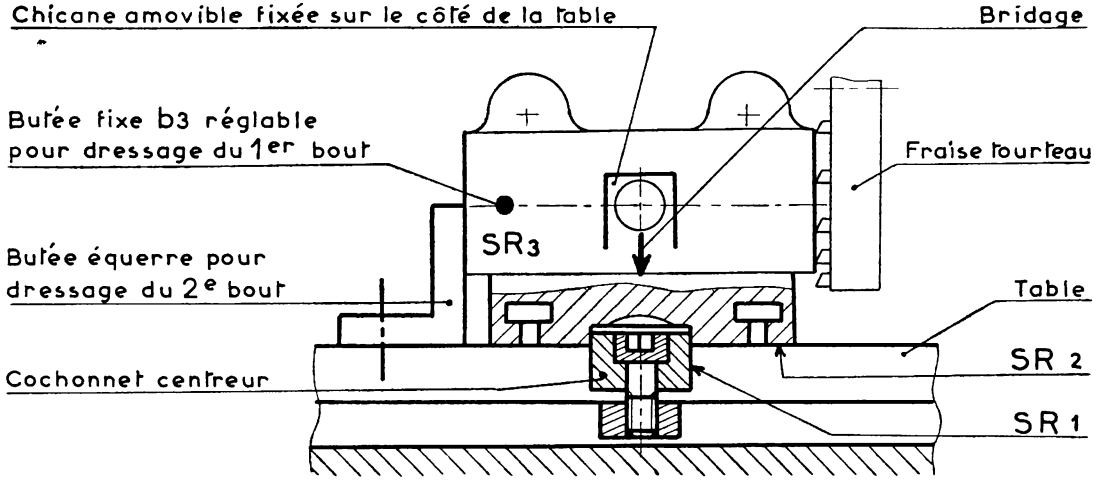


Fig:487- Montage direct sur table pour dressage des bouts

Mettre à profit encore le bossage du trou radial taraudé pour établir une chicane bridée sur la table qui empêchera le montage inversé de la pièce par rapport à la butée fixe réglable $\mathbf{b}_3$. Utiliser une fraise tourteau de diamètre de 200 *mm* environ pour permettre le passage de la tête de la fraiseuse au-dessus de la table.

Le premier bout dressé deviendra la troisième surface de référence $\mathbf{SR}_3$ pour les opérations ultérieures.

Sous-phase 2 et montage.

Pour le dressage du deuxième bout, on utilisera le même montage avec chicane et butée $\mathbf{b}_3$ enlevées. L'orientation se fera par appui d'une butée-équerre glissant sur la table et guidée par deux languettes coulissant dans une rainure de la table, puis abloquée après appui contre $\mathbf{SR}_3$ constituée par le premier bout dressé.

On utilisera la même fraise-tourteau.

Contrôle.

Pied à coulisse.

Sous-phase 3 et montage.

L'entrée radiale en té qui débouche dans la rainure circulaire en té impose tout naturellement sa réalisation sur fraiseuse où les pièces sont déjà rassemblées. C'est l'objet de la sous-phase 3.

La figure 488 montre le montage approprié. L'opération est faite en deux temps :

— défoncer à la fraise 2 tailles;

— terminer à la fraise à té.

Une chicane est encore disposée au-dessus du corps à aléser pour éviter un mauvais montage.

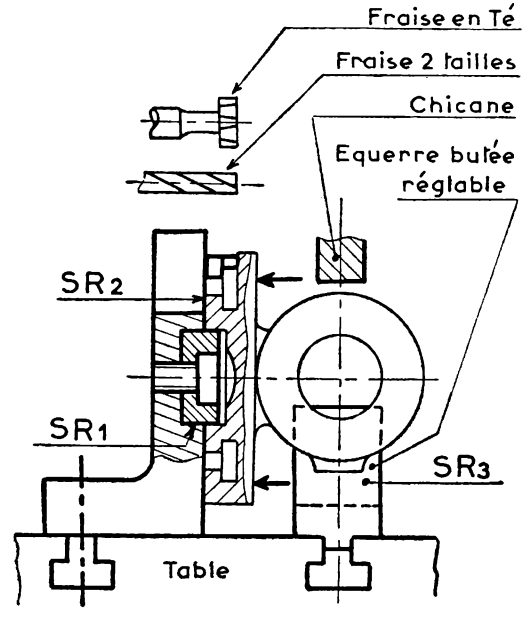


Fig:488- Montage sur équerre pour fraisage de l'entrée des têtes de boulons.

Contrôle.

Pied à coulisse.

Phase 3-0. Alésage.

L'alésage peut être fait à la fraiseuse, à l'aléseuse horizontale ou à la perceuse radiale. Nous choisirons cette dernière machine pour sa commodité et sa rapidité de manœuvre, parce que la pièce est relativement petite et en considérant que l'aléseuse n'est pas disponible pour ce travail.

La figure 489 illustre le montage de la pièce. Centrage par SR_1, appui sur SR_2 et orientation par SR_3.

L'outil est une barre d'alésage avec deux grains préréglés : un grain ébaucheur, un grain finisseur. Les deux grains sont espacés de façon que le grain finisseur attaque après la sortie du grain ébaucheur, c'est-à-dire d'une longueur de 13 à 14 *mm*.

La comparaison de ce procédé avec l'alésage au tour fait ressortir les avantages suivants

— pas de balourd de l'outil tournant;

— plus grande vitesse de rotation;

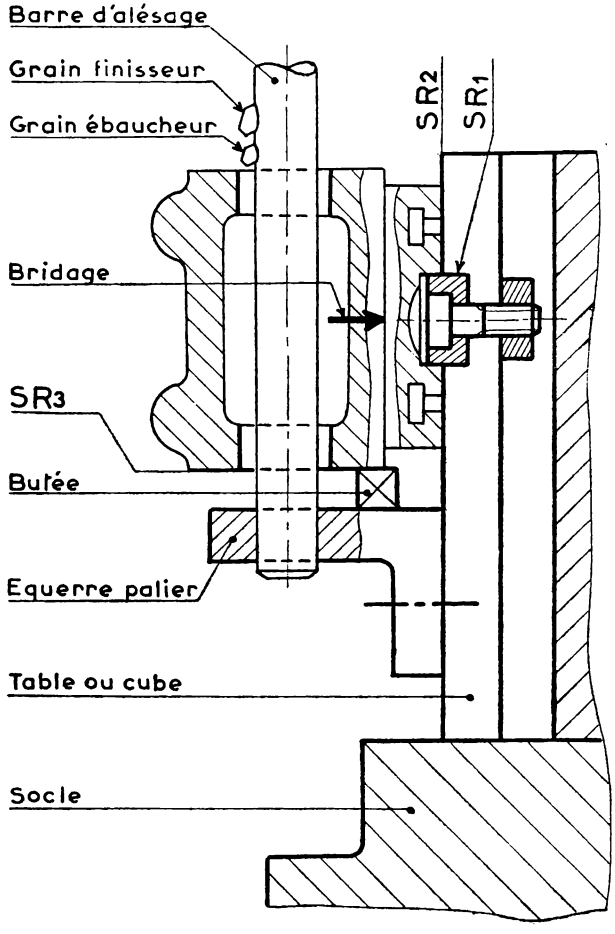


Fig:489 - Montage sur perceuse radiale pour alésage.

— plus grande précision du fait que la barre d'alésage est encastrée à ses deux extrémités, alors que l'outil de tour est en porte-à-faux;

— travail plus rapide, puisqu'il est fait en une seule course de la barre d'alésage.

Contrôle.

Tampon lisse ou jauge plate 40 H8.

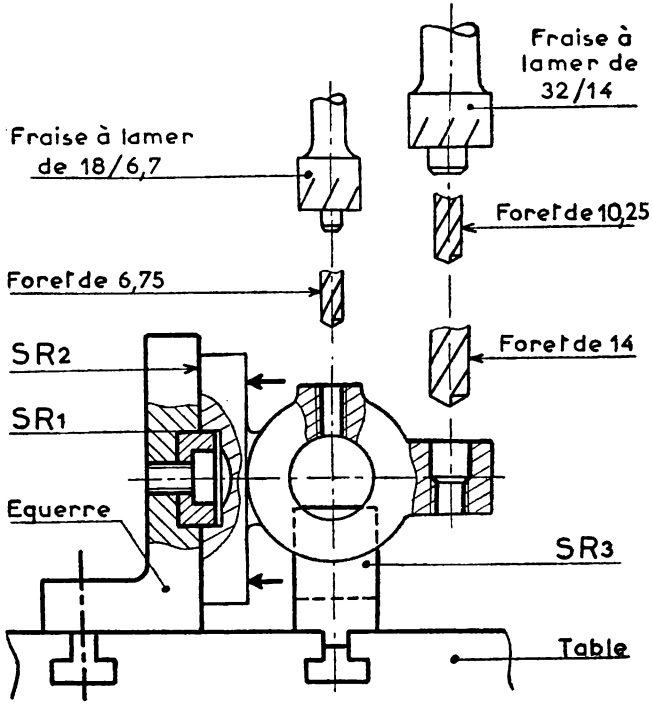


Fig: 490- Montage sur équerre pour perçage, lamage et taraudage.

Phase 4-0. Perçage, lamage, taraudage.

Les trois trous ne demandant pas un positionnement rigoureux, un traçage d'après $\mathbf{SR_2}$ et $\mathbf{SR_3}$ est suffisant.

Le perçage des trous de 14 et les lamages imposent une pièce bridée et non tenue à la main. Nous utiliserons le montage figure 490. L'équerre est bridée sur la table d'une perceuse à colonne et un vérin de soutien est disposé sous le corps alésé. Il ne peut y avoir erreur de montage, puisque les trous sont pointés au pointeau.

La suite des opérations est :

— perçage à profondeur réglée des trous de diamètre 14 *mm*;

— perçage à 10,25 *mm* de diamètre des trous taraudés à 12;
— perçage à 6,75 du trou taraudé à 8;
— lamage des trous de 14;
— lamage du trou de 6,75;
— taraudage à l'aide d'un appareil à tarauder.

Remarque. Pour 5 pièces, le taraudage pourrait être exécuté à la main.

Contrôle.

Tampon fileté de 12 pas 1,75 et tampon fileté de 8 pas 1,25.

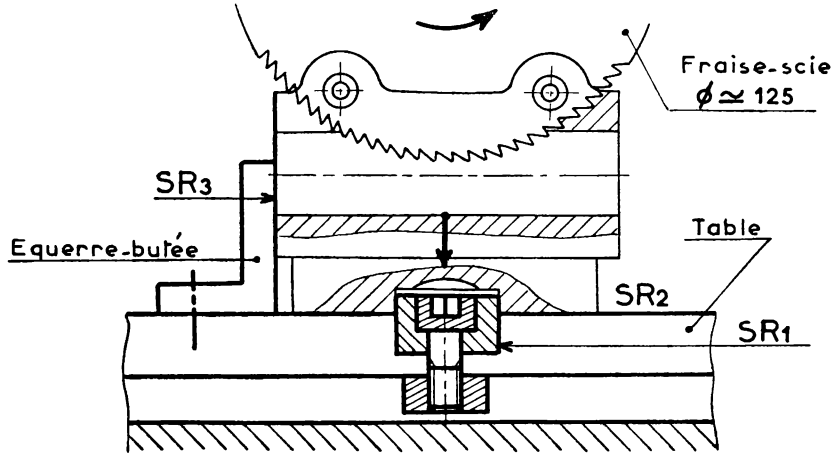


Fig: 491 – Montage direct sur table pour fendage.

Phase 5-0. Fendage.

L'opération est réalisable à la fraiseuse avec le montage utilisé pour le fraisage des bouts (fig. 491). Le travail sera réalisé en une passe avec une fraise scie de 3 *mm* d'épaisseur et de 125 *mm* de diamètre environ.

Cette opération ne nécessite aucun contrôle.

IV. — ÉTABLIR LA GAMME D'USINAGE DE LA PIÈCE PRÉCÉDENTE POUR DES SÉRIES RENOUVELABLES DE 1 000 PIÈCES

Pour une telle production, les moyens précédents ne sont plus acceptables, car ils conduisent à un prix de revient trop élevé parce que :

— le montage des pièces sur les machines est trop long;
— l'usinage est trop fractionné, donc trop long lui aussi;

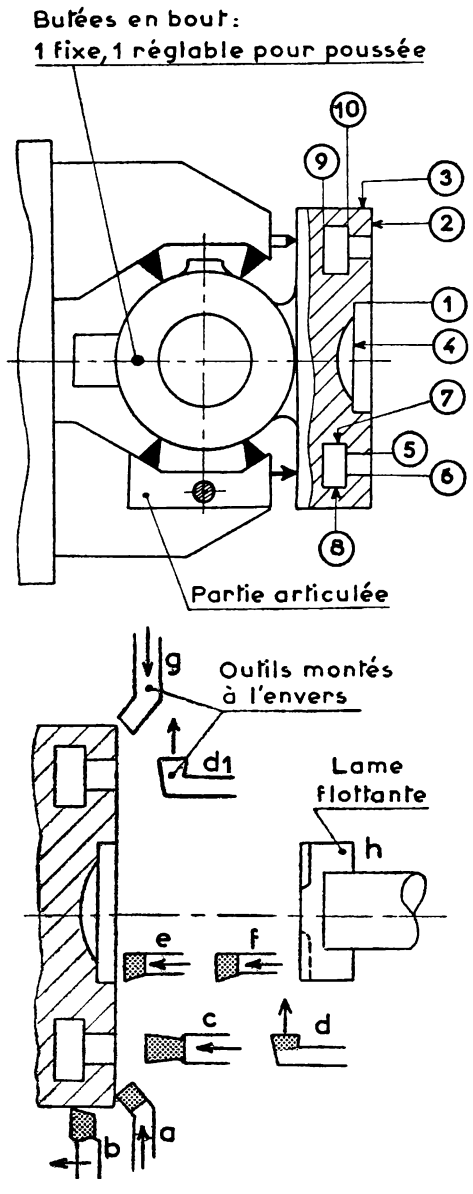
— les montages d'usinage sont trop rudimentaires et la précision de fabrication dépend pour une trop large part de la qualification professionnelle de l'ouvrier, le positionnement des pièces (réglage des butées fixes et blocages des appuis mobiles) étant laissé à son initiative.

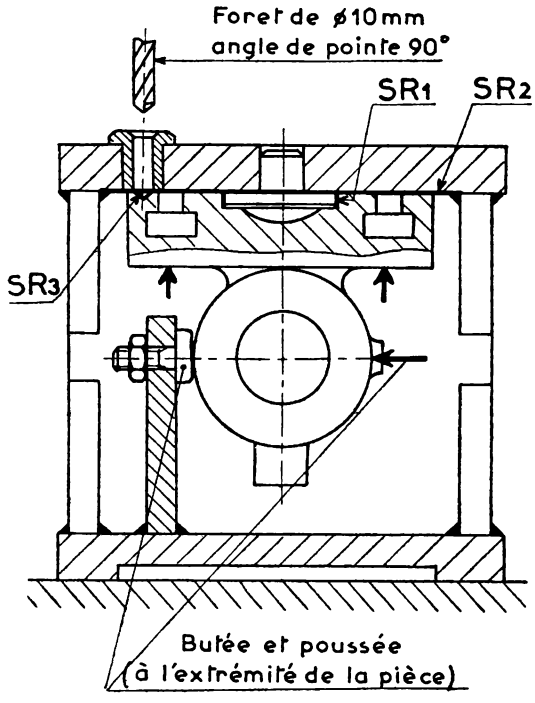
La gamme ci-après est présentée sous l'une des formes généralement adoptées dans l'industrie. Chaque montage est schématisé, mais de telle sorte que la façon de l'utiliser apparaisse nettement pour chacune des phases de travail. On remarquera que le positionnement des pièces est invariablement obtenu par une fraisure jouant le rôle de surface de référence complémentaire. Ainsi, la précision sera mieux assurée et un opérateur de moindre qualification pourra conduire le travail dans des conditions satisfaisantes.

Nota - La gamme proposée n'est pas la seule possible. D'autres solutions pourraient conduire à un ordre des phases différent et à d'autres montages d'usinage pour un même résultat final.

ANALYSE DE FABRICATION			10.05.03
Pièce : ***Support réglable***		Quantités **20 000**	Matière : **Fonte ft 18**

Phase	Désignation des phases, sous-phases et opérations	Machines, outillage et vérificateurs	Croquis des montages et des outils
10	**Tournage**	Tour semi-automatique	
	Sous-phase 1	Mandrin à 2 mors à serrage concentrique	
	a. Ébauche 2 **p** = 3,5	Tourelle AV Outil **a**	
	b. Finition 3 ⌀ 110	Tourelle AV Outil **b**	
	c. Finition rainure 5 et 6 l = 12 prof. = 18	Tourelle pivotante. Outil à trépanner **c**	
	d. Finition rainure 7 8 9 10 l : 10 ⌀ ext. : 100 ⌀ int. : 60	Tourelle AV Outils à rainer **d** et $\mathbf{d_1}$	
	e. Ébauche 1 4 ⌀ 38,5 prof. : 7	Tourelle pivotante. Outil **e**	
	f. Demi-finition 1 Finition 4 ⌀ 39,7 prof. : 7,5	Tourelle pivotante. Outil **f**	
	g. Finition 2 p = 0,5 l = 23	Tourelle AR Outil **g**	
	h. Finition 1 ⌀ 40 H7	Tourelle pivotante. Lame flottante	
		Tampon 40 H7	

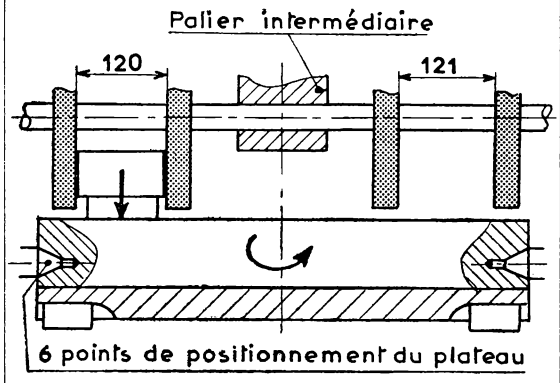
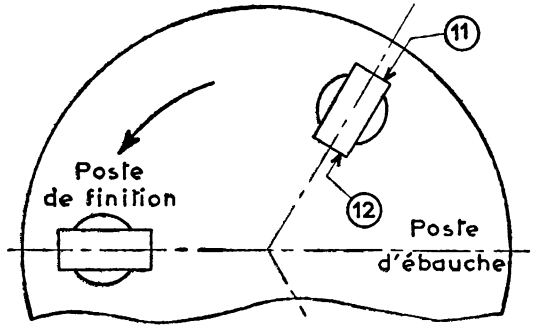
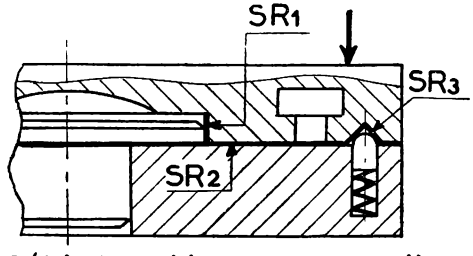


Phase	Désignation des phases, sous-phases et opérations	Machines, outillage et vérificateurs	Croquis des montages et des outils
20	**Perçage** Création d'une 3e surface de référence SR-3 Sous-phase 1 a. Perçage (voir nota)	Perceuse sensitive Montage de perçage 10.05.03-1 Foret ⌀ 10 à queue cylindrique	

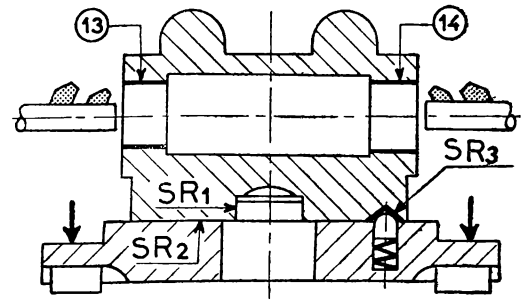
Nota. Le foret est affûté avec un angle de pointe de 90° et l'âme est amincie si nécessaire.

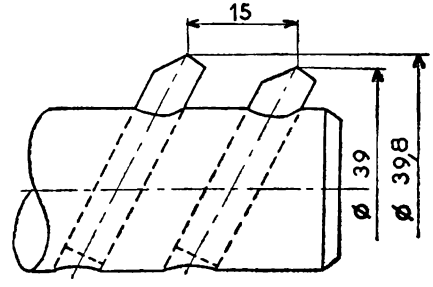
La troisième surface de référence $\mathbf{SR_3}$ est exécutée à l'endroit de l'entrée de la rainure circulaire en **T** et disparaîtra au cours de l'opération de fraisage de cette entrée.

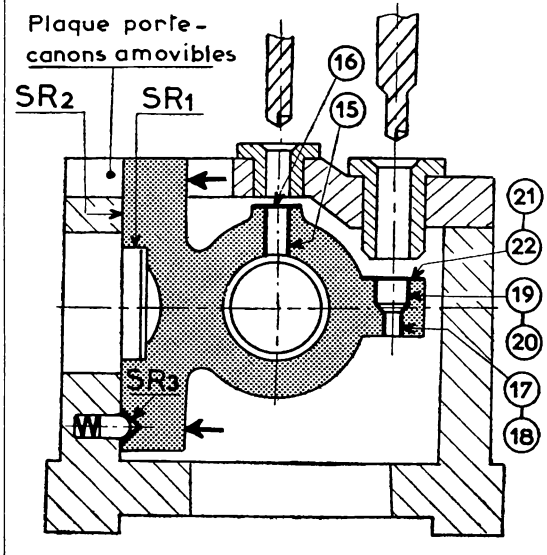
Le perçage est réglé en profondeur de façon que le cône taillé dans la pièce ait un diamètre de base de 10 *mm*.

Phase	Désignation des phases, sous-phases et opérations	Machines, outillage et vérificateurs	Croquis des montages et des outils
30	**Fraisage**	Fraiseuse horizontale Montage à base pivotante à 3 postes 10.05.03-2	
	Sous-phase 1 (Dressage des faces)		
	a. Ébauche **11 12**	Train de fraises à 3 tailles	
	b. Finition **11 12**	Train de fraises à 3 tailles Pied à coulisse	
			 Détail du positionnement de la pièce dans le montage d'usinage

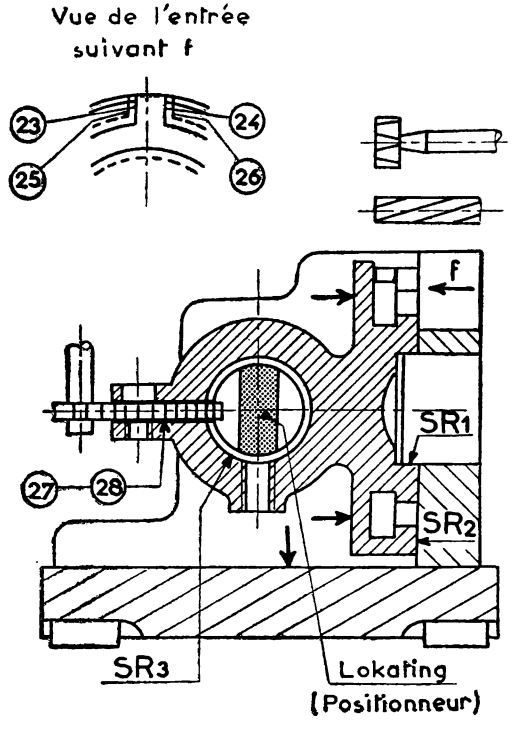
Phase	Désignation des phases, sous-phases et opérations	Machines, outillage et vérificateurs	Croquis des montages et des outils
40	**Alésage**	Aléseuse à 4 broches alignées 2 à 2	
	Sous-phase 1	Montage 10.05.03-3	
	a. Ébauche et demi-finition **13 14** (Voir détail de 2 grains montés)	2 grains montés sur la même barre	
	b. Finition **13 14** ⌀ 40 H8	1 grain monté sur chaque barre Tampon 40 H8	
50	**Perçage**	Perceuse à 3 broches en ligne	
		Montage 10.05.03-4	
	a. Perçage **15**	Foret ⌀ 6,75	
	b. Perçage **17 18 19 20**	Foret étagé ⌀ 14 et 10,25	
	c. Lamage **16** (plaque porte-canons enlevée)	Fraise à lamer ⌀ 18 pilote 6,75	
60	**Lamage**	Perceuse à colonne	
	Sous-phase 1	Montage identique au n° 10.05.03-4	
	a. Lamage **21 22** (plaque porte-canons enlevée)	Fraise à lamer ⌀ 32 pilote 14	







Phase	Désignation des phases, sous-phases et opérations	Machines, outillage et vérificateurs	Croquis des montages et des outils
70	**Taraudage**	Perceuse à colonne	
	Sous-phase 1	Montage identique au n° 10.05.03-4	
	a. Taraudage **15 17 18** (Plaque porte-canons enlevée)	Tarauds machine M8 et M12 Tampons filetés M8 et M12	
80	**Fraisage**	Fraiseuse horizontale	Vue de l'entrée suivant f
	Sous-phase 1 Entrée de la rainure en T	Montage 10.05.03-5	
	a. Finition **23 24** ⌀ 12 - prof. 17,5	Fraise 2 tailles ⌀ 12	
	b. Finition **25 26** ⌀ 20 - prof. 17,5	Fraise en T ⌀ 20 - ép. 10	
	Sous-phase 2 Fendage du palier	Machine équipée d'une tête verticale	
	a. Finition **27 28**	Fraise scie ép. 3	



Imprimeries Oberthur — Dépôt légal n° 6838 2e trimestre 1964